

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



## **PROYECTO FIN DE MASTER**

**SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y  
ORIENTACIÓN BASADO EN RECEPCIÓN  
DIFERENCIAL DE ULTRASONIDOS**

**Santiago Elvira Díaz  
Julio 2011**

# **SISTEMA DE LOCALIZACIÓN Y ORIENTACIÓN BASADO EN RECEPCIÓN DIFERENCIAL DE ULTRASONIDOS**

**AUTOR: Santiago Elvira Díaz**  
**TUTOR: Ángel de Castro Martín**

**HCTLAB**  
**Dpto. de Ingeniería Informática**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Julio 2011**

## **Agradecimientos**

Quisiera dar mi más sincero agradecimiento a todos los integrantes del grupo de investigación HCTLAB, por su ayuda prestada durante todo el desarrollo del proyecto y por permitirme desarrollarlo, en particular a Ángel de Castro, por haber sido capaz de soportarme durante todo este tiempo y creer en mi idea.

Por otro lado, quisiera agradecer a mi familia y amigos el apoyo recibido durante este último año, sin el cual me hubiera vuelto loco entre tanto trabajo.

## Resumen

En este proyecto se detallan los procedimientos utilizados para implementar un sistema autónomo de localización y orientación, diseñado para entornos '*indoor*' y de bajo coste.

Todo el sistema se implementa en base a la tecnología de los ultrasonidos, implementando un sistema basado en la distribución de balizas en determinados puntos de la habitación, las cuales emiten una señal de ultrasonidos que se utiliza para calcular el ángulo de recepción existente entre la baliza y el nodo. Para el cálculo del ángulo de recepción se utilizan tres receptores distribuidos siguiendo la forma de un triángulo isósceles rectángulo, midiendo la diferencia de tiempos de llegada a los diferentes receptores y combinando dicha información con la velocidad de propagación de la señal de ultrasonidos.

Esto posibilita estimar la distancia a las diferentes balizas, posibilitando implementar técnicas de localización para buscar el punto en el espacio que satisface dichas distancias mediante intersección de circunferencias.

El sistema de orientación se ha implementado utilizando el mismo sistema de ultrasonidos, adaptando la orientación relativa obtenida respecto a cualquier baliza en una orientación absoluta respecto a un norte predefinido en base a la posición del nodo.

## Palabras Clave

Robot, localización, orientación, ultrasonidos.

## **Abstract**

In this project, the procedures to obtain a low cost indoor autonomous system that can locate itself and obtain its orientation are detailed.

All the system is based on the ultrasound technology. The transmitters are deployed in the ceil of a room. They send sequentially an ultrasound wave that is used to estimate the reception angle in the robot. In order to measure this angle, the robot has three ultrasound receivers deployed in a righth-angle isosceles triangle distribution. The node measures the difference in the time of arrival of the ultrasound wave in these receivers, and transforms the measurements into an angle in function of the velocity of the signal.

With this angle, the robot can obtain the distance to the transmitter, allowing it to implement localization and orientation techniques.

## **Key Words**

Robot, localization, orientation, ultrasound.

# Índice de Contenidos

<b>1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>2</b>
2.1	Introducción	2
2.2	Localización por ultrasonidos	3
2.2.1	THE BAT SYSTEM	3
2.2.2	The Cricket Location-Support System	3
2.2.3	RF-FREE ULTRASONIC POSITIONING	4
2.2.4	3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station	4
2.2.5	FPGA-based Embedded System for Ultrasonic Positioning	5
2.2.6	IS-900	5
2.3	Sistema Propuesto	5
<b>3</b>	<b>Sistema de estimación de ángulos</b>	<b>6</b>
3.1	Introducción	6
3.2	Cálculo del ángulo de recepción en una dimensión	7
3.3	Cálculo del ángulo de recepción en tres dimensiones	8
<b>4</b>	<b>Sistema de localización</b>	<b>15</b>
4.1	Introducción	15
4.1.1	Basados en ángulos (Triangulation):	15
4.1.2	Basados en distancias (Trilateration):	15
4.1.3	Sistema Escogido	16
4.2	Localización basada en ángulos	16
4.2.1	Algoritmos de localización	17
4.2.1.1	LOCALIZACION 1 D	17
4.2.1.2	LOCALIZACION 2 D Y 3 D	18
4.2.1.2.1	Localización 2D	18
4.2.1.2.2	Localización 3D	21
<b>5</b>	<b>Orientación</b>	<b>24</b>
5.1	Introducción	24
5.2	Orientación respecto a sistemas de referencia	26
<b>6</b>	<b>Implementación</b>	<b>27</b>
6.1	Introducción	27
6.2	Sistema transmisor	28
6.3	Sistema receptor	30
6.3.1	Introducción	30
6.3.2	Placa de Procesamiento	32
6.3.3	Placa Auxiliar	35
6.3.3.1	Tratamiento de la señal de ultrasonidos	38
<b>7</b>	<b>Análisis de fuentes de errores</b>	<b>41</b>
7.1	Introducción	41
7.2	Errores inherentes al sistema	42
7.3	Errores generados durante el tratamiento de la señal de referencia	49

7.4	Errores generados por imprecisiones de la estructura mecánica	53
8	<b>Resultados</b>	57
8.1	Introducción	57
8.2	Medidas Capturadas	58
8.3	Sistema de Localización y Orientación	61
9	<b>Conclusiones</b>	65
10	<b>Trabajo futuro</b>	65

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 3-1: Estimación del ángulo para entornos 1D	7
Ilustración 3-2: Sistema de estimación del ángulo para entornos 3D	8
Ilustración 3-3: Ángulos necesarios	8
Ilustración 3-4: Ángulos de recepción vertical	9
Ilustración 3-5: Ángulos de recepción horizontal	9
Ilustración 3-6: Ejemplo de estimación ángulos para entornos 3D	10
Ilustración 3-7: Análisis R3 → R1	12
Ilustración 3-8: Análisis R2 → R1	13
Ilustración 4-1: Sistemas de localización clásicos basados en ángulos	16
Ilustración 4-2: Localización en entornos 1D	17
Ilustración 4-3: Requisitos para la localización en entornos 2D	18
Ilustración 4-4: Incertidumbre en la localización en entornos 2D	19
Ilustración 4-5: Sistema localización en entornos 2D	20
Ilustración 4-6: Localización en entornos 3D	22
Ilustración 4-7: Localización 3D - Vista cenital	22
Ilustración 5-1: Orientación basada en referencias visuales	24
Ilustración 5-2: Orientación basada en posiciones relativas	24
Ilustración 5-3: Orientación basada en campos magnéticos	25
Ilustración 5-4: Orientación basada en sistemas de referencia	25
Ilustración 6-1: Arquitectura del transmisor	28
Ilustración 6-2: Despliegue del sistema	29
Ilustración 6-3: Componentes del sistema receptor	30
Ilustración 6-4: Sistema Receptor	31
Ilustración 6-5: Arquitectura uBlaze	32
Ilustración 6-6: Arquitectura del esclavo PLB US_Slave	33
Ilustración 6-7: Diagrama de flujo del código SW	34
Ilustración 6-8: Arquitectura de la placa auxiliar	36
Ilustración 6-9: Placa auxiliar	36
Ilustración 6-10: Electrónica etapa de tratamiento + digitalización de la señal US	38
Ilustración 6-11: US fase de comparación 1.0	39
Ilustración 6-12: US fase de comparación 2.0	39
Ilustración 6-13: Medida del desfase	40
Ilustración 7-1: Error por onda no plana 1D	42
Ilustración 7-2: Error onda plana - Ángulo Horizontal (grados)	43
Ilustración 7-3: Error onda plana - Zoom (x = 60 → 300) Ángulo Horizontal (grados)	43
Ilustración 7-4: Error onda plana - Ángulo Vertical (grados)	44

Ilustración 7-5: Error onda plana – Localización (cm) (Dist. Receptores = 30 cm)	45
Ilustración 7-6: Error onda plana – Localización (cm) (Dist. Receptores = 3 cm)	46
Ilustración 7-7: Error velocidad - Ángulo Horizontal (grados)	47
Ilustración 7-8: Error velocidad - Ángulo Vertical (grados)	47
Ilustración 7-9: Error velocidad – Localización (cm)	48
Ilustración 7-10: Beam Angle del receptor de ultrasonidos	49
Ilustración 7-11: Error localización (cm) - Retardo variable (distancia receptores 30 cm)	50
Ilustración 7-12: Error ángulo horizontal (grados) - Retardo variable (distancia receptores 30 cm)	50
Ilustración 7-13: Error localización (cm) - Retardo variable (distancia receptores 3 cm)	51
Ilustración 7-14: Error ángulo horizontal (grados) - Retardo variable (distancia receptores 3 cm)	51
Ilustración 7-15: Error fase digitalización	52
Ilustración 7-16: Error localización (cm) – Diferencia en distancia entre receptores auxiliares (3 cm)	53
Ilustración 7-17: Error localización (cm) – Error en la distribución de los receptores auxiliares (3 cm)	54
Ilustración 7-18: Error localización (cm) – Error en la inclinación del plano de los receptores	55
Ilustración 7-19: Error localización (cm) – Diferencia en distancia entre receptores auxiliares (30 cm)	55
Ilustración 7-20: Error localización (cm) – Error en la distribución de los receptores auxiliares (30 cm)	56
Ilustración 8-1: Puntos de medida	57
Ilustración 8-2: Localización en 100-100	62
Ilustración 8-3: Localización en 160-100	62
Ilustración 8-4: Localización en 160-200	63

## Índice de Tablas

Tabla 1: Funcionalidad pines - Placa Auxiliar	37
Tabla 2: Factor de corrección (pulsos) en las medidas capturadas (número de casos)	58
Tabla 3: Varianza del error en las medidas capturadas	59
Tabla 4: Error medio absoluto en las medidas capturadas	60
Tabla 5: Error ángulo vertical	61
Tabla 6: Errores localización mediana - teórico - referencia	63
Tabla 7: Error ángulo horizontal	64



# 1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el de conseguir un sistema con la capacidad de localizarse y orientarse por sí mismo. En principio, este sistema se utilizará en robots, pero la capacidad de localización y orientación puede ser útil también en otros casos.

Junto con este objetivo principal, se perseguía que el sistema final fuera de bajo coste y que fuese '*indoor*' (funcionara dentro de edificios).

Para satisfacer todos los objetivos antes planteados, se optó por un sistema de localización y orientación basado en ultrasonidos, debido a su bajo coste, su alta precisión y su posibilidad de usarse en entornos '*indoor*'.

La siguiente memoria se divide, principalmente, en los siguientes capítulos:

- Estado del arte: en este capítulo se muestra la evolución de los sistemas de localización '*indoor*'.
- El sistema de estimación del ángulo de recepción: en donde se detallan las bases del funcionamiento del sistema para el cálculo del ángulo recibido.
- El sistema de localización: se comenta nuestro modelo de localización.
- El sistema de orientación: se hace una breve exposición del estado del arte de los sistemas de orientación, seguido de una explicación del sistema de orientación elegido.
- Implementación: se describen todos los elementos implicados en los sistemas de localización y orientación, comentando en detalle su funcionamiento.
- Análisis de errores: en este apartado se analizan las causas que afectan de manera negativa a la precisión del sistema, indicando sus posibles soluciones.
- Resultados: donde se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del sistema.

Cabe destacar que parte de los resultados de este proyecto fin de carrera han sido publicados. Se trata del artículo "FPGA-based System for DTOA Ultrasonic Positioning", publicados en el congreso internacional 26th Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS) 2011.

## **2 Estado del arte**

### **2.1 Introducción**

En los últimos años, la navegación en entornos ‘indoor’ ha sido un área de investigación de gran interés. La imposibilidad del uso de sistemas de navegación de exteriores como GPS, Glonass o Galileo debido a su escasa precisión y a problemas de cobertura ha obligado a la comunidad científica a buscar nuevas alternativas para resolver este problema.

Todo sistema de navegación debe consistir, al menos, de un sistema de localización (con el cual obtener la actual posición del nodo) y de un sistema de orientación (con el cual poder dirigir el nodo), por lo que uno de los principales objetivos del proyecto es el de otorgar a cada uno de los nodos de nuestro sistema las estas capacidades básicas. Además, se ha impuesto como requisitos un bajo coste de implementación y que cada uno de los nodos sea autónomo.

Con el fin de alcanzar el objetivo del proyecto al mismo tiempo que se cumple con los requisitos fijados, se han utilizado métodos de localización basados en ultrasonidos, debido a su bajo coste y a su relación precisión/coste-computacional.

Su alta relación precisión/coste-computacional es debida, principalmente, a la baja velocidad de propagación de la señal de ultrasonidos, lo cual permite implementar contadores de relativa baja frecuencia (del orden de MHz o decenas de MHz) con los cuales estimar el tiempo de vuelo de la onda de ultrasonido entre dos puntos (TOF - “Time Of Flight”).

Su reducido coste viene determinado por el reducido coste de los transductores de ultrasonidos (cuyo precio es menor a 2 euros) y los dispositivos necesarios para su implementación en módulos, repercutiendo en que el coste total de cada módulo no alcanza los 15 euros.

Cabe destacar que, aunque los sistemas basados en ultrasonidos son los más extendidos en entornos ‘indoor’, existen otros métodos de localización basados en radiofrecuencia, láser o en tratamiento de imagen. Sin embargo, estos métodos tienden a ofrecer una menor precisión, un mayor coste computacional y/o un mayor coste económico, lo cual nos llevó a descartar este tipo de métodos para nuestro sistema de navegación.

Para el sistema de orientación se optó por utilizar la misma arquitectura que la utilizada para el sistema de localización, ya que esta nos proporcionaba la orientación relativa a una baliza, por lo que si combinamos dicha información con la propia posición del nodo, es posible obtener la orientación absoluta.

Hoy en día ya existen diversos mecanismos para la obtención de la orientación del robot, de entre los cuales los más comúnmente empleados son el análisis de imágenes, la orientación en función del norte magnético terrestre o la orientación en base a posiciones relativas, sin embargo, estos métodos se descartaron para reducir el coste final del sistema.

## **2.2 Localización por ultrasonidos**

A día de hoy, ya existen diferentes publicaciones que tratan el tema de localización por ultrasonidos. Por mencionar algunos sistemas implementados de los cuales tenemos constancia podemos nombrar:

### **2.2.1 THE BAT SYSTEM**

[Ward1997] Este método ha sido desarrollado por Andy Ward, Alan Jones y Andy Hopper. Basa la localización del nodo en el cálculo de la distancia absoluta entre los diferentes nodos y la red de balizas fijas instalados en el techo (TOA – ‘*Time of Fligh*’) que actúan como receptores, las cuales se encargan de calcular el tiempo de vuelo de la señal emitida por los nodos móviles y enviar dicha información a una unidad central. El nodo central se implementa en un PC y se comunica por un protocolo serie con los nodos fijos y por radiofrecuencia con los nodos móviles. Cumple las funciones de coordinador, encargándose de gestionar qué nodo móvil debe emitir la señal, mientras que por el protocolo serie indica a las balizas que inicialicen los contadores. Tras dejar pasar cierto tiempo, hace ‘*polling*’ (pregunta a las balizas si han recibido la señal y el tiempo transcurrido desde el ‘*trigger*’ hasta que recibieron la señal de ultrasonidos), triangula la posición del nodo móvil y envía dicha posición al nodo móvil.

La arquitectura de este sistema es activa, siendo las balizas las encargadas de recibir la señal de localización, lo que limita el número de posibles nodos y/o la tasa de actualización de la posición de cada nodo. Como la localización se lleva a cabo en un PC es posible añadir, junto con los cálculos sobre la posición del sistema, algoritmos para filtrar el ruido de las medidas. Por otro lado, este sistema necesita informar a los nodos de sus posiciones una vez termina de realizar los cálculos, lo cual conlleva una menor confidencialidad del sistema.

### **2.2.2 The Cricket Location-Support System**

[Priyantha2000] Este método ha sido desarrollado por Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty y Hari Balakrishnan. Se basa en la localización según el modelo TOA, pero, a diferencia del método “THE BAT SYSTEM”, los nodos móviles son los encargados de actuar como nodos receptores y la red de nodos fijos son los encargados de emitir las diferentes señales de ultrasonidos. Cabe mencionar, que sigue existiendo un nodo central, al cual se pueden conectar los nodos móviles y el cual se encarga de triangular la posición. Los nodos sólo envían las medidas de las distancia a cada baliza por un puerto RS232. El nodo central tiene implementado un sistema de mapas con la posición exacta de las balizas, lo cual unido a las distancias calculadas a cada una de ellas por el nodo móvil, le permite implementar algoritmos de localización, permitiendo triangular la posición del nodo móvil.

El sistema está pensado para proveer privacidad a los diferentes nodos del sistema. Cada baliza emite el trigger por radiofrecuencia junto con la información de la

habitación en la que se encuentra la baliza y su ID. Las balizas no están coordinadas entre sí, por lo que pueden existir colisiones. En caso de producirse colisiones, las balizas implicadas esperan un tiempo aleatorio antes de volver a emitir su señal.

El nivel de lógica de los nodos receptores es bastante reducido, implementado sólo un mecanismo para conocer la baliza más próxima al nodo (conociendo así en qué habitación se encuentra el nodo).

La arquitectura de este sistema es pasiva, siendo las balizas las encargadas de transmitir la señal de localización, lo cual elimina las limitaciones sobre el número de nodos del sistema o su tasa de actualización. Como el cálculo de la posición sigue desarrollándose en un PC, se dispone de potencia de cómputo para implementar filtros y de este modo reducir el ruido de las medidas capturadas. Este sistema necesita informar a los nodos de sus posiciones una vez termina de realizar los cálculos, lo cual conlleva una menor seguridad del sistema.

### **2.2.3 RF-FREE ULTRASONIC POSITIONING**

[McCarthy2003] Este sistema ha sido desarrollado por McCarthy, M.R. Muller, H.L. Su principal característica es que presenta un sistema de localización basado en medir la diferencia entre los tiempos de llegada de diferentes señales de ultrasonidos (DTOA – “*Difference Times Of Arrival*”), utilizando ultrasonidos y siguiendo una arquitectura pasiva. Al prescindir del sistema de radiofrecuencia para conocer el tiempo exacto de emisión de la onda de ultrasonidos, las balizas emiten en un orden secuencial, dejando entre cada emisión un tiempo de guarda. Tras esto se formula un sistema de ecuaciones con 5 incógnitas (las tres coordenadas, el instante de emisión de la señal de ultrasonidos y el periodo de emisión entre las balizas). Para poder despejar estas incógnitas se utiliza un filtro Kalman para linealizar la ecuación antes de calcular la posición del receptor. Todos los cálculos necesarios para calcular la posición del receptor se realizan en un PC de baja potencia.

### **2.2.4 3-D Indoor Positioning Method using a Single Compact Base Station**

[Dijk2004] Este sistema ha sido desarrollado por Dijk, E.O. van Berkel, C.H. Aarts, R.M. van Loenen, E.J. Este sistema se basa en los modelos DTOA utilizando una arquitectura pasiva. El sistema está pensado para instalar una única estación base por habitación, la cual contiene tres emisores de ultrasonidos. La emisión de la señal de ultrasonidos es simultánea para los tres emisores, utilizando un código CDMA para lograr diferenciar la señal de cada uno de los transmisores, prescindiendo de la señal de radiofrecuencia al no ser necesario conocer el instante de transmisión de la señal. Para conocer la posición del nodo, se implementa en un PC un sistema de minimización por mínimos cuadrados capturando tres medidas, teniendo que linealizar la función de coste para ello.

Este sistema destaca frente al resto en la facilidad del despliegue, ya que al sólo existir una estación base por habitación y no transmitir señal de radiofrecuencia, cada estación base es independiente del resto y repercute en un coste menor por estación

emisora. Sin embargo, la proximidad de los emisores entre sí conlleva una precisión menor que la de otros sistemas

### **2.2.5 FPGA-based Embedded System for Ultrasonic Positioning**

[Sanchez2009, Sanchez2010] Este sistema ha sido desarrollado en el grupo HCTLab de la UAM, habiendo participado en el mismo el autor de este Trabajo Fin de Máster. Su principal novedad frente a otros sistemas es que prescinden del PC para implementar el sistema de localización TOA, realizando los cálculos necesarios en un microprocesador de bajas prestaciones o en una FPGA, otorgando una mayor seguridad al sistema y mejorando la robustez del mismo dando una mayor autonomía a los nodos. El sistema logra una precisión comparable a la de los sistemas antes descritos aplicando un filtro de mediana a las medidas capturadas antes de resolver la posición del mismo.

### **2.2.6 IS-900**

[www.isense.com] Este sistema es un modelo comercial desarrollado por la compañía Intersense. Utiliza una tecnología híbrida para conseguir una localización precisa, combinando la localización mediante ultrasonidos con un sistema de acelerómetros. El sistema despliega una red de emisores de ultrasonidos en el techo de la habitación y utiliza la localización del nodo aplicando el modelo TOA. Para minimizar el error se ayuda de un filtro Kalman y la información obtenida de los acelerómetros.

Cabe destacar que tanto los nodos como la red de emisores están conectados a un nodo central, el cual se encarga de coordinar los nodos emisores y calcular la posición de los nodos. Además, cabe resaltar que el coste del conjunto es de 9.950 dólares si el sistema es cableado y de 36.600 dólares si es inalámbrico.

## **2.3 Sistema Propuesto**

El sistema de localización propuesto se basa en los modelos DTOA, prescindiendo de este modo de la necesidad del uso de señales de radiofrecuencia para sincronizar el sistema emisor con los diferentes nodos del sistema.

Su principal novedad respecto a los sistemas presentados es que el cálculo de la posición del nodo se obtiene de manera analítica, sin necesidad de linealizar las ecuaciones obtenidas, recurriendo para ello a la estimación del ángulo existente entre el nodo y el transmisor. Para ello, se equipa al nodo con tres receptores y se mide la diferencia entre los tiempos de llegada a estos.

Las principales ventajas de nuestro sistema es que se requiere de sólo dos transmisores para lograr una localización en un espacio tridimensional, obteniendo junto con la localización del nodo su propia orientación. Además, sus requisitos computacionales no son mayores que los sistemas TOA antes mencionados, pudiéndose implementar en microprocesadores de bajas prestaciones. Sin embargo, el sistema necesita de una etapa de tratamiento de señal mucho más compleja, dependiendo los resultados, en gran medida, de cómo de precisa sea esta.

## 3 Sistema de estimación de ángulos

### 3.1 Introducción

Nuestro sistema de localización/orientación basa su funcionamiento en estimar el ángulo de recepción de la señal de referencia. Para poder comprender el funcionamiento de nuestro sistema es necesario analizar cómo se propaga la señal de referencia por el espacio.

Cuando un transmisor comienza a emitir una señal, esta se propaga por el espacio llegando a las diferentes partes del entorno en diferentes instantes de tiempo, en función del camino que recorre dicha señal. Si consideramos que los transmisores emiten de forma omnidireccional y que no existen reflexiones ni obstáculos, el tiempo requerido para que la señal alcance un determinado punto del espacio estará en función únicamente de la distancia entre dicho punto y el transmisor. De este modo, el tiempo que transcurre entre que una misma señal es recibida en un determinado punto y otros adyacentes sólo dependerá de la diferencia entre las distancias de dichos puntos respecto al transmisor y la velocidad de propagación de la señal de referencia.

Actualmente, ya se han estudiado diversos métodos para el cálculo de la posición de un nodo a partir de la medición de las diferencia de tiempos, existiendo los métodos DTOA (*"Difference Time Of Arrival"*), basados en la intersección de hipérbolas-hiperboloideas, u otros que linealizan el sistema de ecuaciones para convertirlo en un sistema TOA (*"Time Of Arrival"*) y operan con intersección de circunferencias-esferas.

La alternativa que se propone en este trabajo consiste en extraer información del ángulo de recepción y extrapolar la posición de los receptores en función de dicho ángulo y la propia posición del transmisor, difiriendo sustancialmente de los métodos DTOA empleados anteriormente.

Para ilustrar este proceso, se comentará cómo localizar un punto situado en un espacio unidimensional conociendo la posición de un transmisor.

### 3.2 Cálculo del ángulo de recepción en una dimensión

En este caso, el nodo a localizar consta de dos receptores alineados en el eje unidimensional que define las posibles posiciones del nodo, mientras que el transmisor se sitúa en cualquier punto del espacio a una distancia 'h' de dicha línea. Ambos receptores están situados a una distancia 'a', tal y como se ilustra en la Ilustración 3-1.

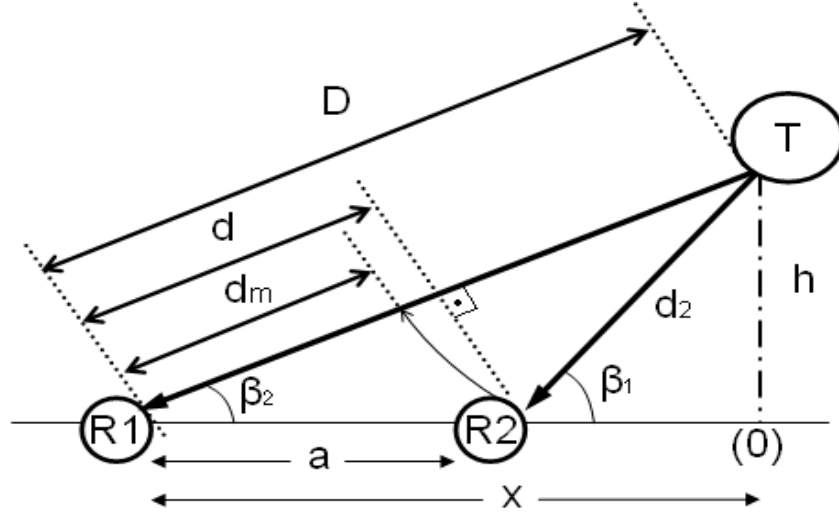


Ilustración 3-1: Estimación del ángulo para entornos 1D

Cuando la señal llega al primer receptor 'R2' (situado a una distancia 'd<sub>2</sub>' del transmisor), a la señal de referencia todavía le falta por recorrer una distancia 'd<sub>m</sub>' para alcanzar al segundo receptor 'R1'. El tiempo que transcurre mientras recorre esa distancia se puede medir utilizando un contador a una determinada frecuencia que se inicia cuando la señal llega al primer receptor 'R2' y que se para cuando llega al segundo 'R1', obteniendo de este modo 'N<sub>clk</sub>'.

$$d_m = \frac{V \cdot N_{clk}}{f_{clk}}$$

Para poder aplicar trigonometría de manera sencilla, es necesario aplicar una condición antes de empezar a resolver el sistema, la cual implica que:

$$h \gg a$$

Si se da esta condición, entonces:

$$\beta_1 \approx \beta_2 \approx \beta \quad d_m \approx d$$

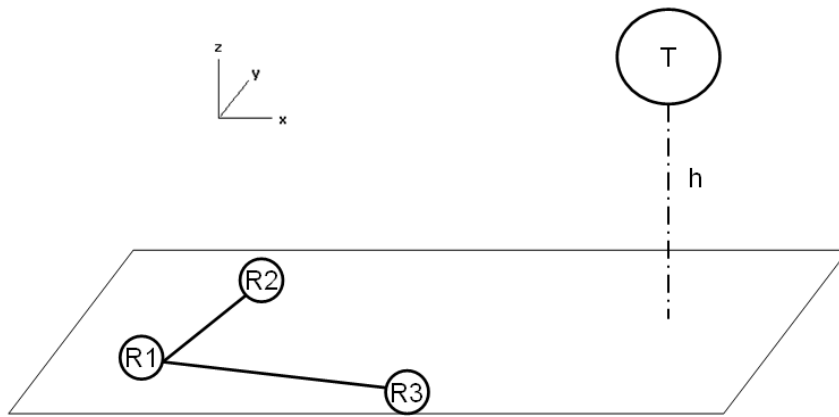
De este modo, se considera que ambos ángulos de recepción son semejantes entre sí y que la distancia antes calculada se puede considerar como uno de los lados de un triángulo rectángulo de hipotenusa 'a' (distancia entre los receptores) pudiendo despejar el ángulo de recepción aplicando la siguiente razón trigonométrica:

$$a \cdot \cos(\beta) = d \Rightarrow \cos(\beta) = \frac{d}{a} \approx \frac{d_m}{a} = \frac{V \cdot N_{clk}}{a \cdot f_{clk}}$$

### 3.3 Cálculo del ángulo de recepción en tres dimensiones

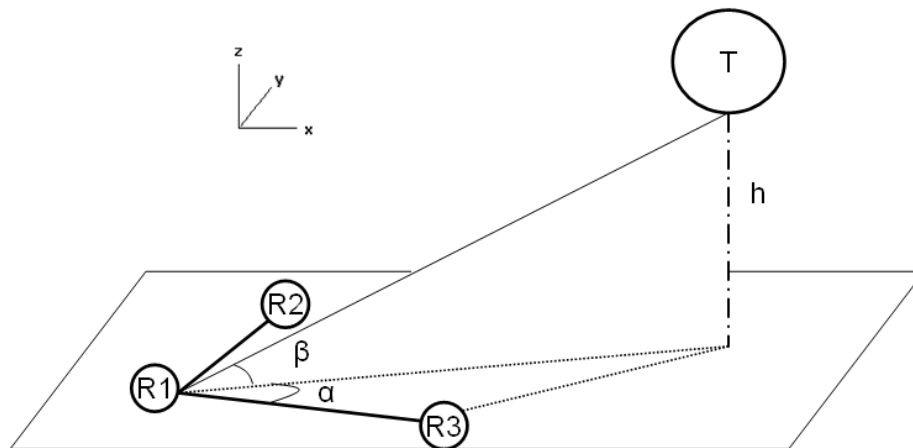
Si se desea estimar la posición de un nodo que se desplaza en un espacio tridimensional, es necesario conocer un nuevo ángulo en nuestro sistema, necesitando agregar un nuevo receptor a nuestro nodo.

Si consideramos el nodo como un ente de dimensionalidad dos (todos los receptores se sitúan en un mismo plano) y definimos un sistema de coordenadas ortonormal con dos de sus ejes ('X' e 'Y') contenidos en el plano en el que se encuentra definido el nodo, y el tercer eje ('Z') perpendicular a dicho plano, tenemos un sistema semejante al que se muestra en la Ilustración 3-2:



**Ilustración 3-2: Sistema de estimación del ángulo para entornos 3D**

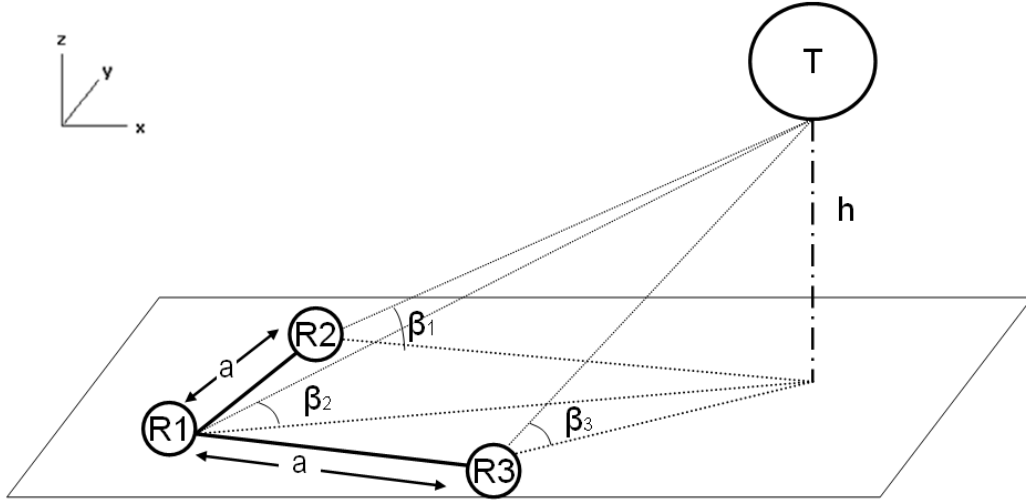
Para definir unívocamente la orientación del nodo respecto al transmisor, es necesario estimar dos ángulos en el sistema (Ilustración 3-3). El primero es el ángulo de recepción en el plano XY de la línea que forman dos de los receptores con la proyección del vector que une el transmisor con uno de los anteriores receptores sobre el plano XY, el cual denominaremos ángulo de recepción horizontal ( $\alpha$ ), mientras que el segundo ángulo es el ángulo que forma el vector de la señal de referencia en el plano que contiene al transmisor y al receptor antes citado, y que a su vez es perpendicular al plano XY. A este ángulo le denominaremos ángulo de recepción vertical ( $\beta$ ).



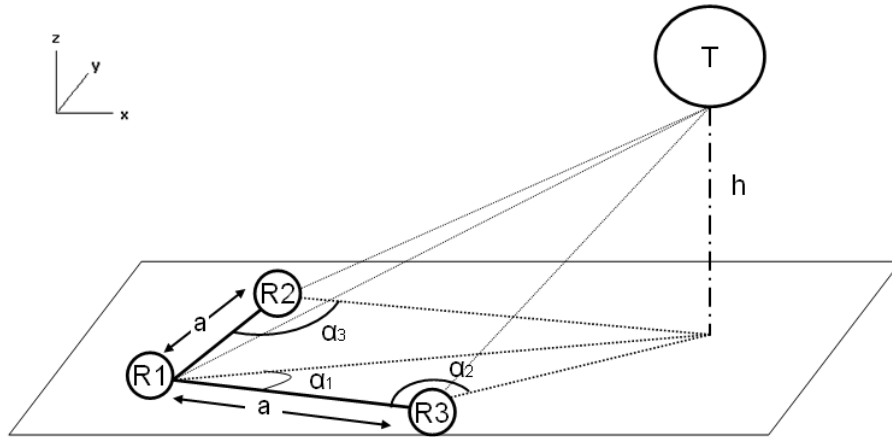
**Ilustración 3-3: Ángulos necesarios**



El resultado de este procedimiento es que los ángulos calculados hacen referencia a uno sólo de los receptores del nodo, al cual denominaremos receptor de referencia. El resto de receptores se consideran auxiliares y aunque la señal de referencia llegará con un ángulo de recepción vertical semejante a todos ellos (siempre que  $h \gg a$ ) (Ilustración 3-4), el ángulo de recepción horizontal es único para cada receptor (Ilustración 3-5)



**Ilustración 3-4: Ángulos de recepción vertical**

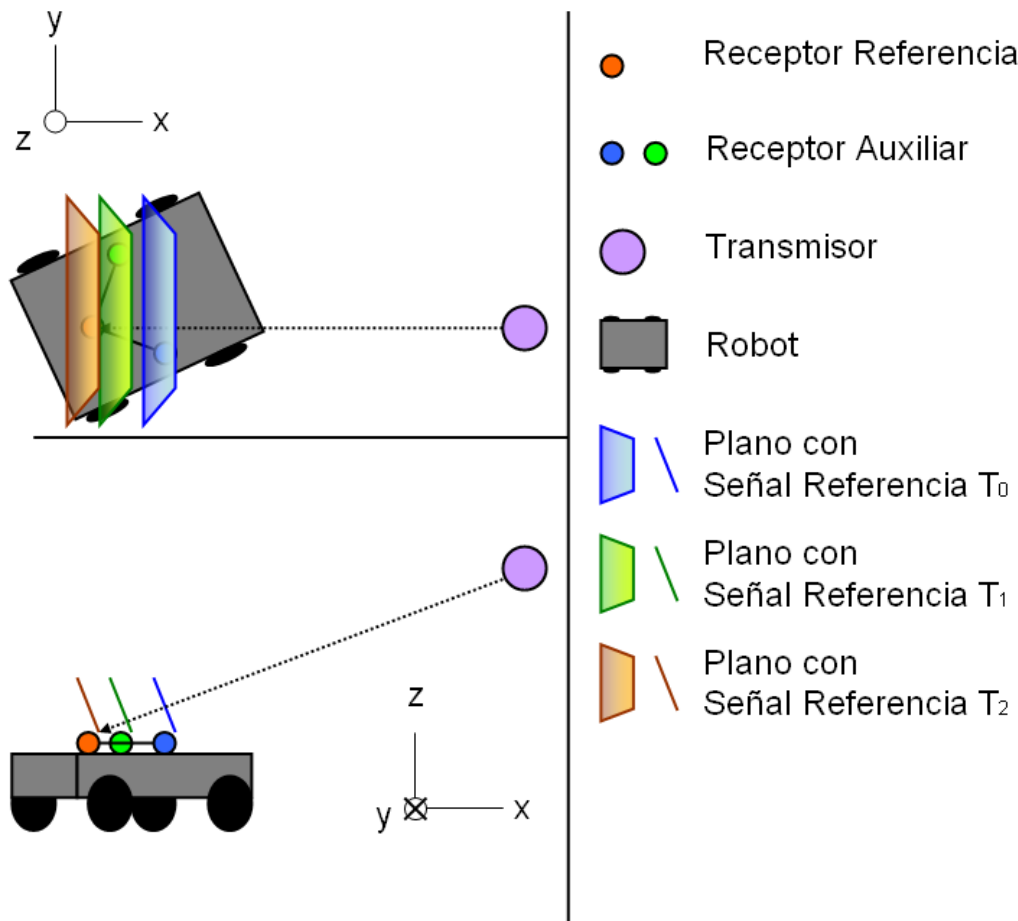


**Ilustración 3-5: Ángulos de recepción horizontal**

Para simplificar los futuros cálculos, es recomendable escoger como receptor de referencia a R1, utilizando R2 y R3 como receptores auxiliares y desplegar los receptores auxiliares a una distancia común ( $a$ ) del receptor de referencia y formando un triángulo rectángulo (Ilustración 3-3).

Al disponer de tres receptores, el nodo es capaz de obtener 2 diferencias de tiempos de llegada independientes de una misma onda de referencia. Estas dos medidas pueden ser  $[R3 \rightarrow R2 \mid R2 \rightarrow R1]$ ,  $[R1 \rightarrow R3 \mid R2 \rightarrow R3]$ ,... por poner algunos ejemplos. Una vez conocidas estas dos diferencias, es posible calcular cualquier otra relación sumando o restando las medidas capturadas entre sí. En nuestro caso, las diferencias de tiempos que vamos a utilizar son las que relacionan los receptores auxiliares con el receptor de referencia, es decir  $[R3 \rightarrow R1 \mid R2 \rightarrow R1]$ .

Siempre que  $h \gg a$ , podemos aproximar que la señal de referencia alcanzará a los receptores como un plano definido por un vector normal al mismo, el cual será la resta entre la posición del transmisor y el receptor de referencia. Cuando dicho plano alcanza uno de los receptores, se inicia el proceso de medición del tiempo de vuelo de la señal, concluyendo cuando la señal alcanza el resto de receptores. De esta forma dispondremos del tiempo de vuelo de la señal de referencia entre los tres receptores en función de la dirección de aproximación de la misma sólo teniendo que combinar estas medidas para extraer las relaciones entre los receptores auxiliares y el receptor de referencia. Esto se puede observar en la Ilustración 3-6:



**Ilustración 3-6: Ejemplo de estimación ángulos para entornos 3D**

En la ilustración, la señal de referencia alcanza primero a receptor auxiliar azul (R3) en  $T_0$ , tras  $T_1$  us la señal alcanza el receptor auxiliar (R2) y  $T_2$  us después el receptor de referencia (R1). De esta forma:

$$R3 \rightarrow R2 = T1 \text{ us}$$

$$R2 \rightarrow R1 = T2 \text{ us}$$

Por lo que:

$$R2 \rightarrow R1 = T2$$

$$R3 \rightarrow R1 = T1 + T2 \text{ us}$$

Si la onda llega en sentido opuesto, utilizaríamos el signo ‘-’ en las medidas para indicar este hecho. Por ejemplo:

Si la señal de referencia alcanza primero a R3, 5 us después a R1 y 12 us después a R2. De esta forma:

$$R3 \rightarrow R1 = 5 \text{ us}$$

$$R1 \rightarrow R2 = 12 \text{ us}$$

Nuestro sistema devolvería la siguiente relación:

$$R2 \rightarrow R1 = -12 \text{ us}$$

$$R3 \rightarrow R1 = 5 \text{ us}$$

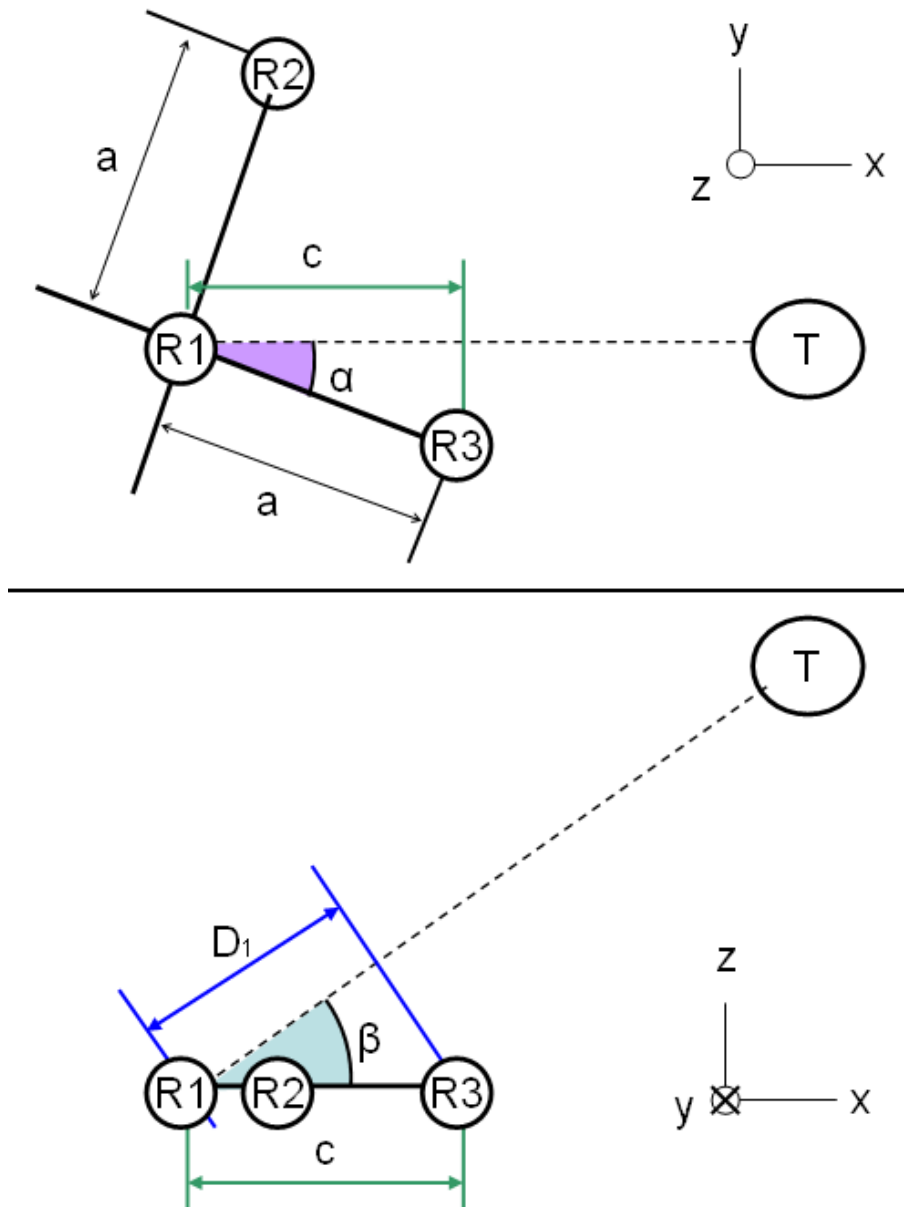
El tiempo medido puede convertirse a distancia, ya que la velocidad de la señal de referencia (ultrasonidos) es conocida. Cada una de estas medidas indica la distancia existente entre el plano que contiene uno de los receptores auxiliares (planos azul y verde de la Ilustración 3-6) y el plano del receptor de referencia (plano marrón de la Ilustración 3-6), los cuales son paralelos entre sí al ser la dirección de propagación única. Cada una de estas distancias indica que el plano que contiene al receptor auxiliar es tangente a una esfera cuyo centro es el receptor de referencia y cuyo radio es la distancia calculada.

Como a priori el sistema desconoce la dirección de propagación de la señal de referencia, con sólo una medida, las posibles soluciones del sistema son infinitas y comprenden todos aquellos planos que satisfacen que el vector normal de plano pertenece a uno de los posibles radios de la correspondiente esfera y que el plano contiene al receptor auxiliar, lo cuales se concentran en una circunferencia definida en la propia esfera cuyo centro está comprendido en el eje que une el receptor auxiliar y el receptor de referencia.

Para despejar la incertidumbre del sistema, se necesita de una medida adicional del receptor de referencia respecto a un segundo receptor auxiliar. De este modo se genera una segunda circunferencia. Bajo estas condiciones, sólo existen en el sistema dos vectores que satisfagan que su origen es el nodo de referencia y que contienen a las dos circunferencias generadas, un vector cuya componente Z es positiva y otro cuya componente Z es negativa. Como nuestros receptores sólo son capaces de capturar las señales que se aproximan por encima del plano de referencia, la solución al sistema es única.

Para analizar cómo se despeja el ángulo de recepción horizontal analíticamente, realizaremos un análisis trigonométrico del sistema.

Si nos centramos en la primera medida ( $R3 \rightarrow R1 = D_1$ ), la distancia calculada es el módulo del vector normal al plano que pasa por R1.



**Ilustración 3-7: Análisis  $R3 \rightarrow R1$**

Como se puede apreciar en la Ilustración 3-7, es posible sacar la siguiente relación:

$$c = \frac{D_1}{\cos(\beta)} = a \cdot \cos(\alpha)$$

Este mismo procedimiento se realiza con la medida generada respecto al segundo receptor ( $R2 \rightarrow R1 = D_2$ )

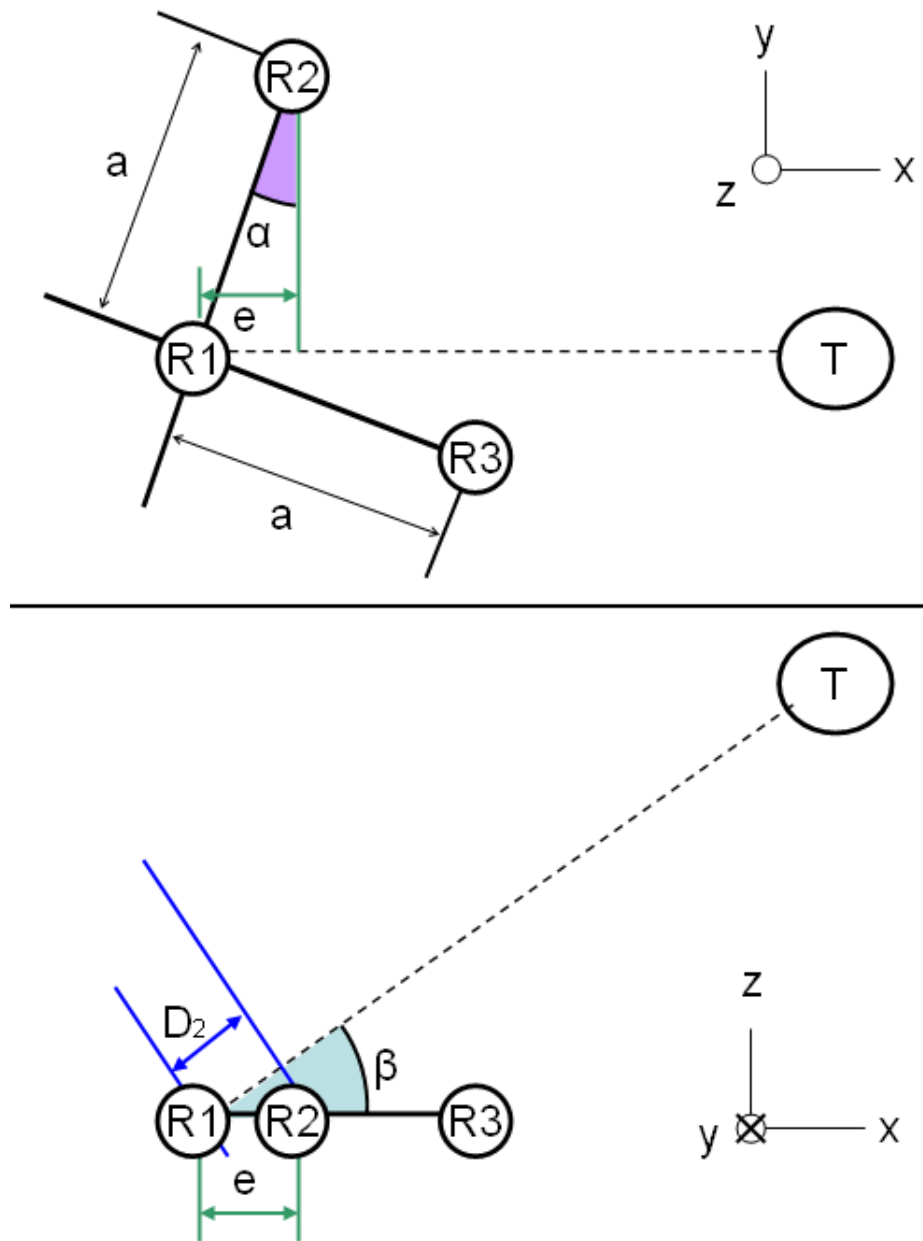


Ilustración 3-8: Análisis  $R2 \rightarrow R1$

Obteniendo:

$$e = \frac{D_2}{\cos(\beta)} = a \cdot \sin(\alpha)$$

Para deducir  $\alpha$ , sólo hay que relacionar ‘c’ con ‘e’:

$$c = \frac{D_1}{\cos(\beta)} = a \cos(\alpha) \rightarrow \cos(\alpha) = \frac{D_1}{a \cos(\beta)}$$

$$e = \frac{D_2}{\cos(\beta)} = a \cdot \text{sen}(\alpha) \rightarrow \text{sen}(\alpha) = \frac{D_2}{a \cos(\beta)}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{sen}(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$\cos(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{\tan^2(\alpha) + 1}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{D_2^2}{D_1^2} + 1}} = \sqrt{\frac{D_1^2}{D_2^2 + D_1^2}}$$

$$\sin(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\tan^2(\alpha)} + 1}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{D_1^2}{D_2^2} + 1}} = \sqrt{\frac{D_2^2}{D_2^2 + D_1^2}}$$

Una vez conocemos el ángulo de recepción horizontal, podemos calcular el ángulo de recepción vertical despejándolo de la ecuación inicial:

$$e = \frac{D_2}{\cos(\beta)} = a \cdot \text{sen}(\alpha) \rightarrow \cos(\beta) = \frac{D_2}{a \cdot \text{sen}(\alpha)} = \frac{D_2}{a \sqrt{\frac{D_2^2}{D_2^2 + D_1^2}}} = \frac{\sqrt{D_2^2 + D_1^2}}{a}$$

$$\sin(\beta) = \sqrt{1 - \cos^2(\beta)} = \sqrt{1 - \frac{D_2^2 + D_1^2}{a^2}}$$

Con las relaciones seno y coseno de los ángulos a los diferentes transmisores, se procede a despejar la posición del nodo en el espacio, tal y como se detalla en el apartado “Localización basada en ángulos”, y la orientación del mismo, analizada en el capítulo “Orientación”.

## 4 Sistema de localización

### 4.1 Introducción

Para poder implementar un sistema de navegación, es requisito imprescindible que el sistema conozca la posición en la que se encuentra y de este modo poder conocer la información necesaria para poder alcanzar su destino de manera eficaz.

Actualmente, existen diferentes algoritmos de localización bien conocidos y basados en principios geométricos [Bensky2007, Mannings2008]. La mayoría de los métodos empleados basan su funcionamiento en uno de estos dos principios:

#### 4.1.1 Basados en ángulos (Triangulation):

Estos métodos basan la localización del nodo móvil en la capacidad del receptor de conocer los ángulos de recepción de las señales de localización y en el conocimiento de la posición de los emisores, obteniendo la posición del nodo mediante el uso de fórmulas trigonométricas. Los principales inconvenientes de estos métodos son la forma de calcular, de manera precisa, el ángulo con el que el emisor está enviando su señal y en el coste computacional que representa el operar con fórmulas trigonométricas. Tradicionalmente, estos métodos se implementaban mediante sistemas de antenas direccionales muy precisas, lo cual repercutía de manera muy negativa en el coste final de cada uno de los nodos. Un ejemplo práctico de la implementación de este método es su utilización para la localización de los barcos en alta mar.

#### 4.1.2 Basados en distancias (Trilateration):

Estos algoritmos basan su funcionamiento en la capacidad del nodo para conocer el tiempo de vuelo existente entre los diferentes emisores y el propio receptor, junto con el conocimiento del receptor de la posición exacta de los distintos emisores. Los valores de los tiempos de vuelo pueden ser absolutos (TOA - "*Time Of Arrival*") o relativos entre las ondas enviadas por los diferentes emisores (DTOA - "*Difference Time Of Arrival*").

Una vez que el receptor conoce la distancia, o la diferencia de distancias, a los diferentes emisores, es capaz de conocer su posición intentando encontrar aquel punto del espacio en el cual las medidas capturadas a los diferentes emisores son coherentes. La búsqueda del mismo se realiza en función del método utilizado, siendo mediante intersección de esferas si se conocen las distancias absolutas (TOA), o mediante intersección de hiperboloides en el caso de diferencias relativas (DTOA). Algunos ejemplos prácticos de tecnologías que se basan en estos principios son:

- **Basados en diferencia de distancias:** DeccaNavigatorSystem, OMEGA, NavigationSystem, GEE, LORAN-C, A-FLT...
- **Basados en distancias absolutas:** GPS, Galileo,...

### 4.1.3 Sistema Escogido

De entre los métodos explicados anteriormente, en este proyecto se optó por el método basado en ángulos en vez de distancias debido a que, aunque repercute en un mayor coste computacional para el robot, permite obtener no sólo la localización del nodo, sino también su orientación sin necesidad de recurrir a sistemas auxiliares para ello.

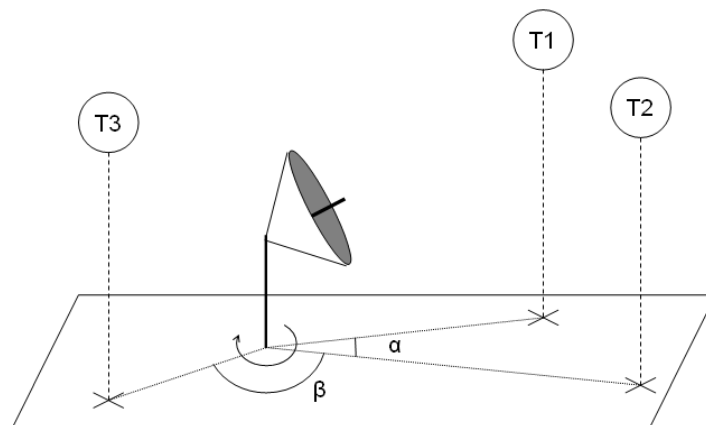
## 4.2 Localización basada en ángulos

Los algoritmos de localización basados en ángulos permiten conocer la posición de cualquier punto en el espacio si se conoce la localización de un determinado número de balizas y los ángulos respecto a estas.

La primera aplicación del uso de ángulos para la estimación de distancias data del siglo seis antes de Cristo, donde el filósofo griego Thales basó su estimación de la altura de las pirámides en la medición de las sombras de las mismas cuando la longitud de su propia sombra era semejante a su propia altura (el Sol se encontraba a  $45^\circ$ ). Desde entonces, el uso de los ángulos se ha ido extendiendo a diversas áreas como la topología, la astronomía, la navegación,...

Aunque antaño fue una herramienta bastante extendida, hoy en día es una tecnología casi obsoleta en los sistemas de localización. Esto es debido al avance que han experimentado los diferentes métodos de localización basados en medición de las distancias a las balizas, como el GPS, los cuales resolvían los mismos problemas que antes se resolvían utilizando ángulos pero implicando un menor coste de fabricación.

Este coste menor viene determinado principalmente por la forma de tomar las medidas necesarias para poder aplicar los diferentes algoritmos de localización. De este modo, para poder estimar el ángulo de recepción de una determinada señal, la solución utilizada tradicionalmente implicaba el uso de antenas muy direccionales y del cambio de orientación de las mismas hasta obtener la máxima potencia de señal recibida, lo cual implicaba un coste de implementación mucho mayor que el necesario en los sistemas basados en medición de distancias, en donde se utilizan antenas omnidireccionales y no es necesario orientar el sistema ni medir la potencia de la señal recibida.



**Ilustración 4-1: Sistemas de localización clásicos basados en ángulos**



Además de ser más costosos en términos económicos, el hecho de necesitar trabajar con funciones trigonométricas implica un mayor coste computacional, lo cual es una desventaja frente a los métodos basados en medición de distancia en donde se trabaja con esferas.

Aunque no es posible evitar trabajar con funciones trigonométricas sin perder precisión, en el actual trabajo se presenta un sistema de medición de ángulos, basado en la tecnología de los ultrasonidos, cuyo coste económico se asemeja al requerido para la implementación de otras técnicas de localización basadas en la estimación de la distancia a las balizas y que además tiene la ventaja que proporciona la información necesaria para obtener la orientación absoluta del sistema.

## 4.2.1 Algoritmos de localización

Para que el nodo sea capaz de conocer su posición, es necesario que este conozca su orientación respecto a un determinado número de balizas, donde el mínimo número de balizas viene determinado por la dimensionalidad del problema. Así, mientras que para los sistemas de una dimensión sólo es necesario disponer de una baliza, si deseamos localizar un punto en dos o tres dimensiones necesitamos de hasta tres balizas para poder eliminar la incertidumbre del problema.

### 4.2.1.1 LOCALIZACION 1 D

Para poder localizar un nodo que se sitúa a lo largo de un espacio de una sola dimensión, sólo es necesario conocer un ángulo en nuestro sistema (ya que no existe orientación horizontal), siendo necesario que nuestro nodo sólo disponga de dos receptores. Como las posibles posiciones del nodo se restringen a un espacio unidimensional, sólo existe un punto en el espacio que satisfaga un determinado ángulo de recepción, necesitando únicamente de un transmisor para calcular la posición del nodo (Ilustración 4-2).

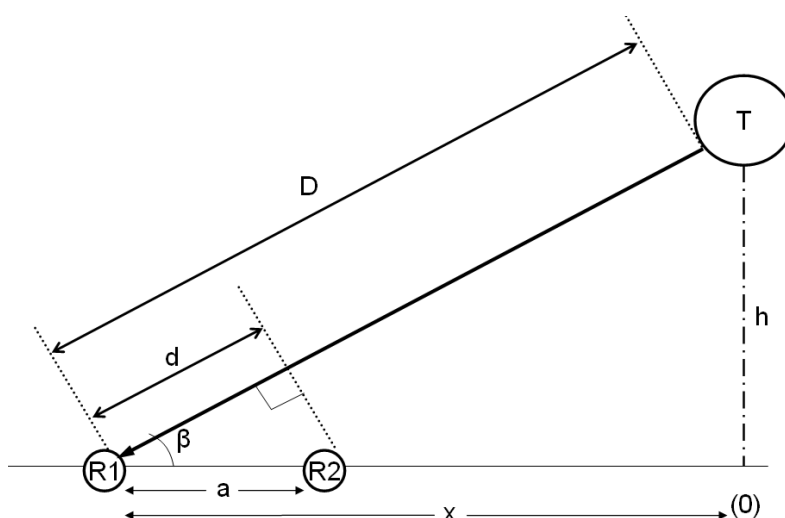


Ilustración 4-2: Localización en entornos 1D

Conociendo el ángulo ' $\beta$ ', el cálculo de la distancia entre el receptor 'R1' y el transmisor se puede despejar fácilmente, ya que se conoce la distancia entre el eje de desplazamiento y el propio transmisor ('h'):

$$h = D \cdot \sin(\beta) \Rightarrow D = \frac{h}{\sin(\beta)}$$

Con la distancia calculada, se despeja la posición del nodo:

$$h^2 + X^2 = D^2 \Rightarrow X = h \sqrt{\frac{1}{\sin^2(\beta)} - 1} = h \sqrt{\frac{1}{1 - \cos^2(\beta)} - 1} = h \sqrt{\frac{a^2}{a^2 - d^2} - 1}$$

Este planteamiento presenta dos posibles soluciones ( $\pm X$ ), pero dicha incertidumbre se resuelve atendiendo al orden de recepción de la señal de referencia, siendo +X si el orden de llegada es R2  $\rightarrow$  R1 y -X si el orden de llegada es R1  $\rightarrow$  R2.

#### 4.2.1.2 LOCALIZACION 2 D Y 3 D

Si deseamos eliminar la restricción del desplazamiento del nodo en una sola dimensión, otorgándole libertad de movimiento en dos o tres dimensiones, es necesario disponer de la orientación horizontal y vertical del mismo.

##### 4.2.1.2.1 Localización 2D

En el caso de la localización 2D, es necesario que haya dos transmisores y el nodo receptor debe conocer a la altura a la que se encuentran los transmisores 'h' y la orientación horizontal y vertical respecto de ellos Ilustración 4-3.

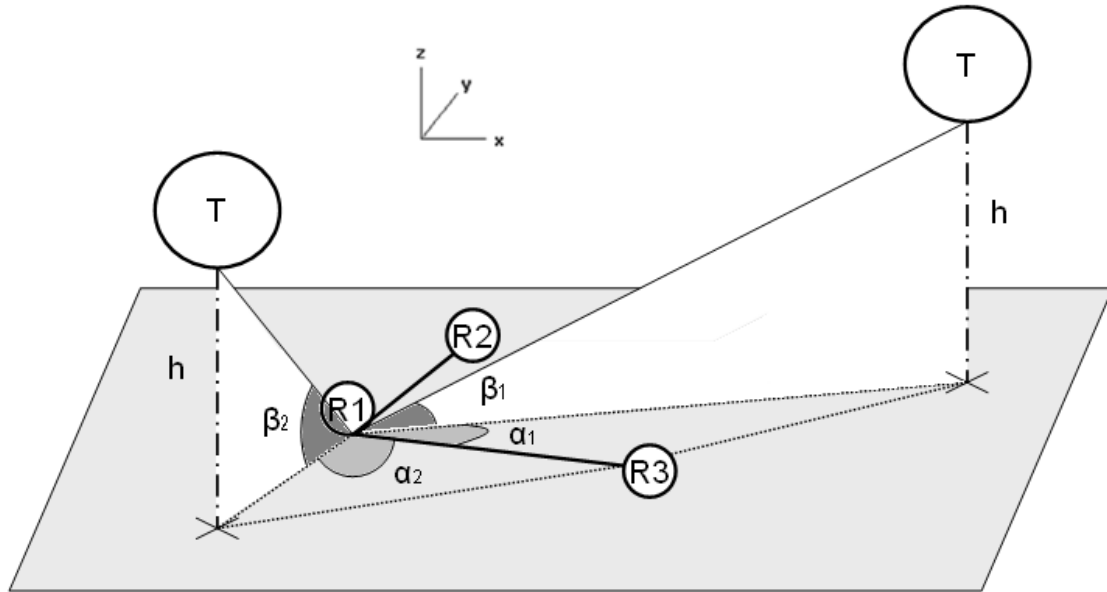
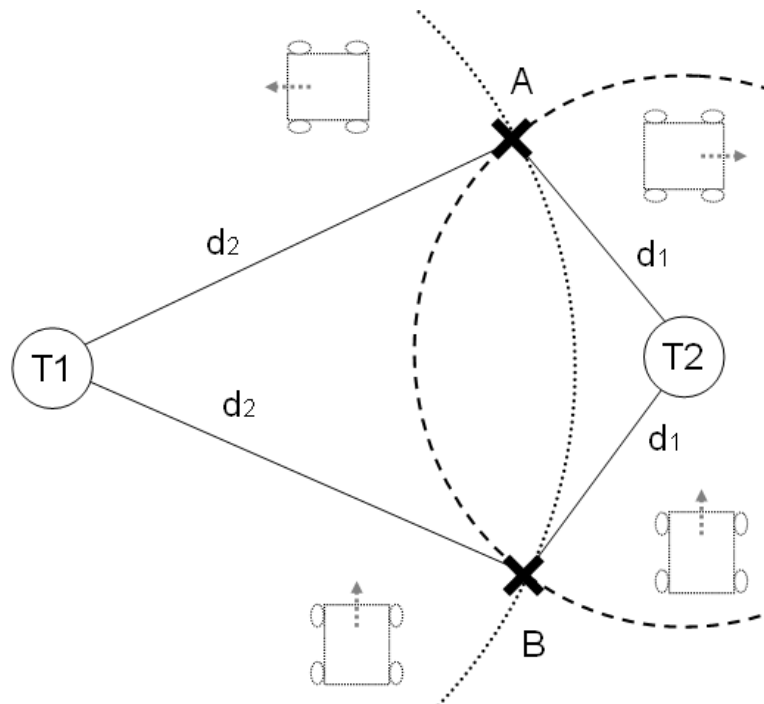


Ilustración 4-3: Requisitos para la localización en entornos 2D

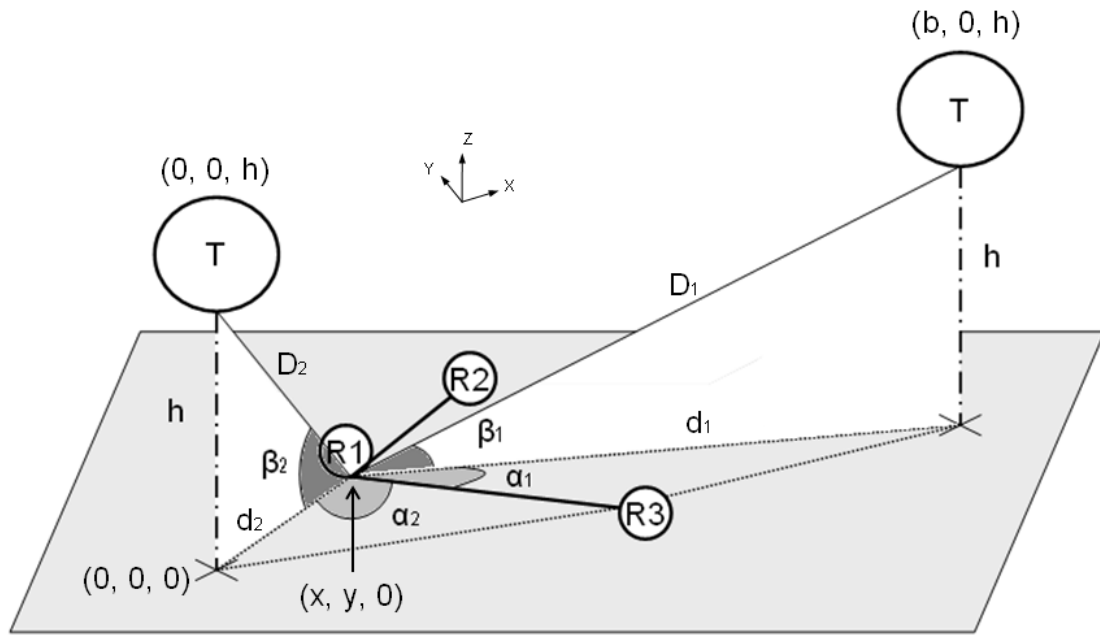
Esto es debido a que si sólo conocemos la orientación respecto a un único transmisor, aunque podemos deducir la distancia a la que estamos de dicho transmisor,

el sistema desconoce su orientación absoluta, existiendo, en su plano de movimiento, infinitos puntos situados en una circunferencia cuyo centro se sitúa en la proyección del transmisor. Para despejar esta incertidumbre, el nodo debe conocer su orientación absoluta utilizando otro sistema de orientación o conocer su orientación relativa respecto a otro transmisor, para de este modo buscar los dos puntos ('A' y 'B') en donde se intersecan ambas circunferencias y descartar aquel cuya orientación horizontal absoluta no sea coherente (Ilustración 4-4)



**Ilustración 4-4: Incertidumbre en la localización en entornos 2D**

En nuestro sistema se optó por utilizar la segunda alternativa, implementado un sistema de transmisión que consta de dos emisores distanciados ' $b$ ' m y situados a una altura de ' $h$ ' m sobre el plano de movimiento del robot. En el robot, los receptores auxiliares (R2 y R3) se sitúan a una distancia ' $a$ ' m del receptor de referencia (R1) formando un triángulo rectángulo (Ilustración 4-5)



**Ilustración 4-5: Sistema localización en entornos 2D**

Para despejar la incertidumbre sobre la posición del nodo en el espacio se aplica el siguiente razonamiento:

$$h = D_1 \cdot \sin(\beta_1) \Rightarrow D_1 = \frac{h}{\sin(\beta_1)}$$

$$d_1 = D_1 \cos(\beta_1) = \frac{h}{\tan(\beta_1)}$$

$$h = D_2 \cdot \sin(\beta_2) \Rightarrow D_2 = \frac{h}{\sin(\beta_2)}$$

$$d_2 = D_2 \cos(\beta_2) = \frac{h}{\tan(\beta_2)}$$

Una vez conocemos la distancia proyectada a los dos transmisores, resolvemos un sistema de intersección de circunferencias. Para simplificar el desarrollo, consideraremos que ambos transmisores están alineados en uno de los ejes a una distancia 'b', y que uno de los transmisores se sitúa en el punto (0, 0, h), por lo que los posibles puntos en los que se puede encontrar el nodo deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$d_1^2 = X^2 + Y^2$$

$$d_2^2 = (b - X)^2 + Y^2$$

Despejando el sistema de ecuaciones, podemos calcular los puntos 'A' y 'B':

$$X = \frac{d_1^2 - d_2^2 + b^2}{2 \cdot b}$$

$$Y = \pm \sqrt{d_1^2 - X^2}$$

Una vez conocemos los dos posibles puntos del espacio en que intersecan ambas circunferencias, es necesario obtener la orientación absoluta respecto a un norte definido en el sistema, descartando aquel punto que en el que la orientación absoluta calculada respecto a ambos transmisores no coincida. El proceso para la obtención de la orientación absoluta se detalla en el capítulo 5. Orientación

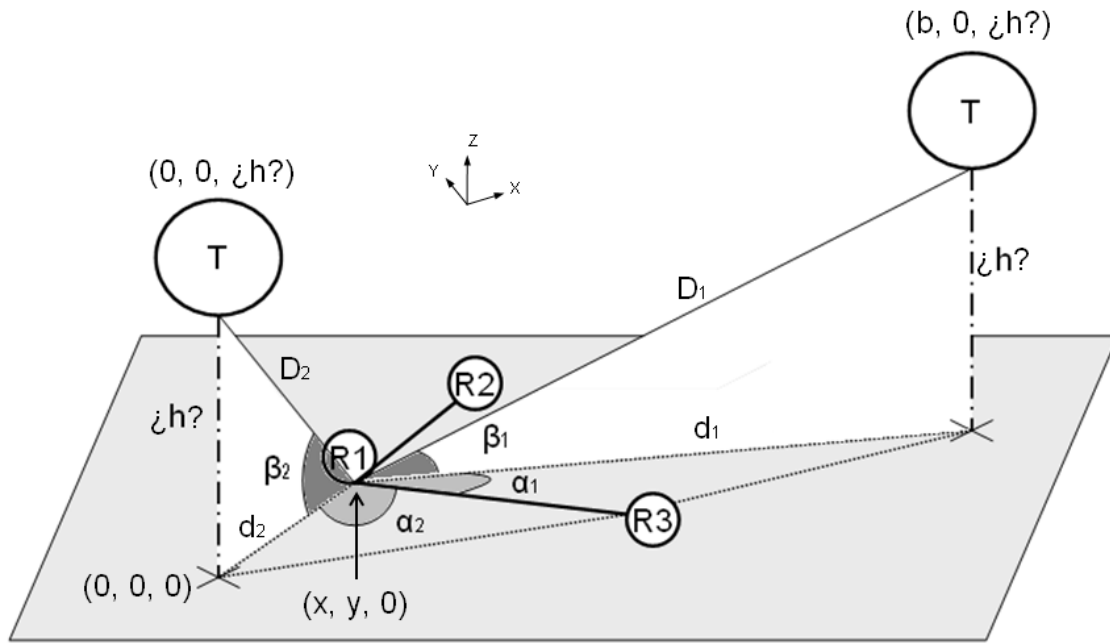
#### ***4.2.1.2.2 Localización 3D***

En el caso de la localización 3D, el nodo de receptor desconoce la altura a la que se encuentran los transmisores ‘h’. Además, como el sistema se puede desplazar y orientarse en tres dimensiones, los posibles puntos, respecto a un único transmisor, en los que se puede encontrar el nodo se sitúan en todo el espacio. Para despejar la incertidumbre de este sistema, sería necesario conocer la orientación respecto al menos tres transmisores, decreciendo los posibles puntos a una circunferencia utilizando dos transmisores, y de una circunferencia a dos puntos conociendo los ángulos respecto a tres. En este último caso, se descarta aquel punto cuya orientación absoluta no sea coherente respecto a todos los transmisores.

Sin embargo, el hecho de que los receptores de ultrasonidos sean direccionales implica que, si deseamos otorgar al nodo la capacidad de capturar la señal de referencia desde cualquier orientación, deberíamos garantizar que al menos en todo momento existan tres receptores en la línea de visión de tres transmisores, lo cual implica que o bien cubrimos el objeto a localizar con una maya de receptores, o distribuimos por el entorno un mayor número de transmisores, por lo que el resultado final conlleva un incremento significativo del coste.

Por este motivo, se añadió una nueva restricción al sistema, la cual consiste en que los receptores de ultrasonidos siempre se sitúan en un plano paralelo a uno predefinido (el suelo de la habitación, por ejemplo). Así, aunque el nodo puede situarse en cualquier punto del espacio, este tiene restringida su orientación al propio plano, tal y como sucedía en el caso de la localización en 2D. Por este motivo, nuestro sistema 3D se transforma en un sistema 2D en donde se desconoce la altura a la que se encuentran los transmisores respecto al plano en donde se encuentra el nodo, por lo que sólo es necesario conocer la distancia a dos de los transmisores como en el caso anterior.

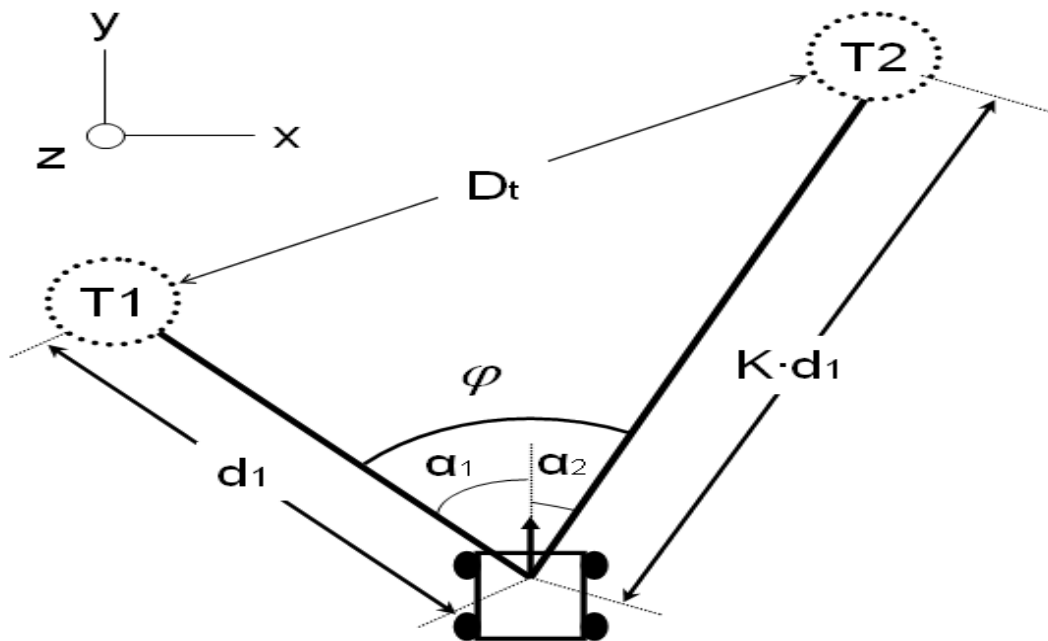
Para poder despejar la incertidumbre en este sistema, es necesario plantear el problema desde otro punto de vista, ya que a diferencia del caso anterior, el cálculo de las distancia entre los transmisores y el receptor no es inmediata. Para simplificar el sistema de ecuaciones, se considera que todos los transmisores se sitúan a una misma altura respecto del plano en donde se coloca el nodo. De este modo, y como se puede apreciar en la Ilustración 4-6, se satisface que:



**Ilustración 4-6: Localización en entornos 3D**

$$D_1 \cdot \sin(\beta_1) = h = D_2 \cdot \sin(\beta_2) \Rightarrow D_2 = D_1 \frac{\sin(\beta_1)}{\sin(\beta_2)} = D_1 \cdot M$$

Co esta relación entre las distancias a los dos transmisores, se puede generar un triángulo cuyos vértices son la proyección de los dos transmisores sobre el plano donde se sitúa el nodo y la propia posición del nodo (Ilustración 4-7).



**Ilustración 4-7: Localización 3D - Vista cenital**

$$d_1 = D_1 \cos(\beta_1)$$

$$d_2 = D_2 \cos(\beta_2) = MD_1 \cos(\beta_2)$$

$$\frac{d_2}{d_1} = M \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\beta_1)} = \frac{\sin(\beta_1)}{\sin(\beta_2)} \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\beta_1)} = \frac{\tan(\beta_1)}{\tan(\beta_2)} = K$$

De este triángulo se conocen la distancia entre los transmisores ( $D_t$ ), ya que al situarse en un plano paralelo, la distancia proyectada entre ambos transmisores es idéntica a la distancia sin proyectar, y la relación entre sus otros dos lados. Además, es posible conocer el ángulo de recepción del nodo a los transmisores, combinando los ángulos horizontales obtenidos.

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2$$

Aplicando el teorema del coseno sobre este triángulo, se deduce la distancia proyectada entre los transmisores y el nodo:

$$D_t^2 = d_1^2 + d_1^2 K^2 - 2 \cdot d_1^2 \cdot K \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow d_1^2 = \frac{D_t^2}{1 + K^2 - 2 \cdot K \cdot \cos(\varphi)}$$

$$d_2 = K \cdot d_1$$

A partir de estas dos distancias, somos capaces de extraer la posición del nodo sobre el plano en el que se encuentra, aplicando intersección de circunferencias tal y como se ha implementado para el caso de dos dimensiones.

$$d_1^2 = X^2 + Y^2$$

$$d_2^2 = (D_t - X)^2 + Y^2$$

$$X = \frac{d_1^2 - d_2^2 + D_t^2}{2 \cdot D_t}$$

$$Y = \pm \sqrt{d_1^2 - X^2}$$

Solo falta determinar la altura a la que se encuentra el nodo respecto al plano de los transmisores, la cual se obtiene:

$$D_1 = \frac{d_1}{\cos(\beta_1)}$$

$$h = D_1 \cdot \sin(\beta_1) = d_1 \tan(\beta_1)$$

De esta forma, el nodo es capaz de determinar sus tres coordenadas, logrando localizarse en un espacio tridimensional.

## 5 Orientación

### 5.1 Introducción

Una vez el nodo conoce su posición exacta, sólo le falta extraer su orientación absoluta respecto a un norte prefijado para poder realizar tareas básicas de navegación.

Para poder obtener esta información, se puede utilizar alguno de los múltiples sistemas de orientación ya desarrollados, entre los cuales cabe destacar:

- **Orientación basada en referencias visuales:** Este mecanismo se basa en que el sistema dispone de una cámara con la cual se capturan imágenes de una determinada zona (techo, paredes,...) en donde se localizan vectores que indican la dirección del norte del sistema, gracias a lo cual, el nodo es capaz de orientarse.(Ilustración 5-1)

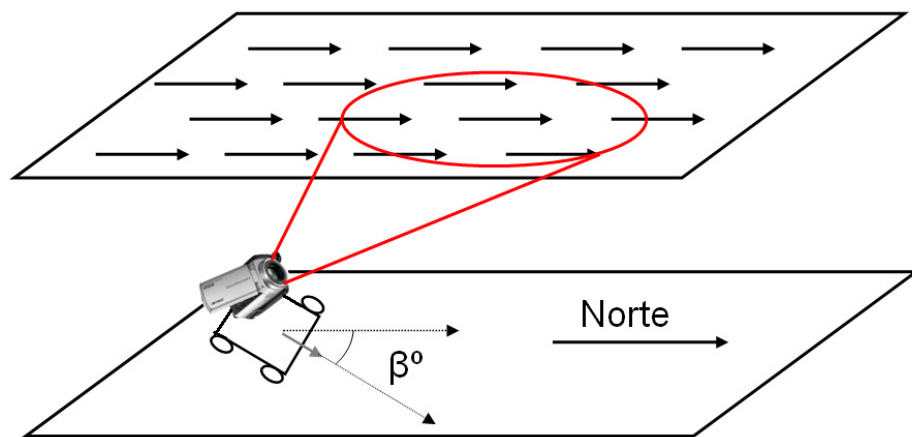


Ilustración 5-1: Orientación basada en referencias visuales

- **Orientación basada en medidas de posiciones relativas:** Esta orientación se basa en que, cuando el robot se mueve, este modifica su posición. De este modo, el programa es capaz de generar el vector de movimiento entre su posición inicial y su posición final a partir del cual se extrae la orientación del nodo. (Ilustración 5-2)

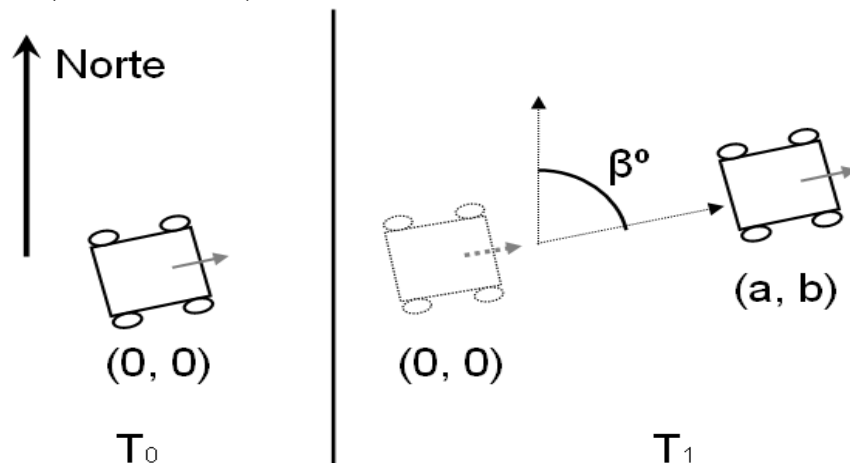


Ilustración 5-2: Orientación basada en posiciones relativas



- **Orientación en base a un campo electromagnético de referencia:** Existen diversos sensores capaces de medir la dirección de un determinado campo electromagnético, por ejemplo, el campo magnético terrestre. Este principio es el que se utiliza en la orientación mediante brújulas electrónicas. (Ilustración 5-3)

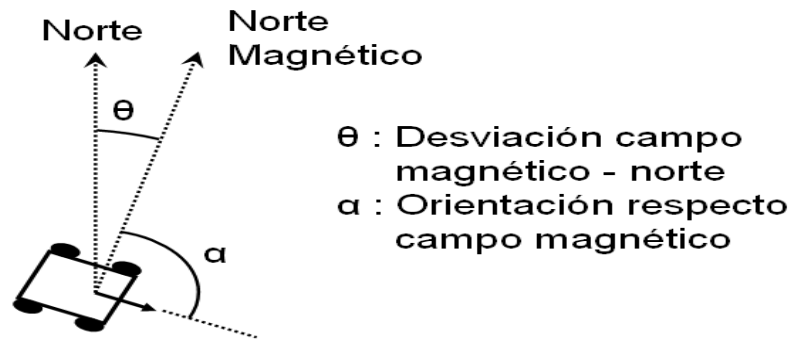


Ilustración 5-3: Orientación basada en campos magnéticos

- **Orientación respecto a sistemas de referencia:** Estos sistemas basan su funcionamiento en conocer la posición del nodo, la posición de un punto de referencia y la orientación relativa del nodo respecto a dicho punto. De este modo, el sistema es capaz de generar el vector que une la posición del nodo con el punto de referencia, pudiendo calcular la orientación debida a la posición del nodo ( $\theta$ ). Al conocer la orientación relativa al punto de referencia ( $\alpha$ ), sólo se necesita combinar ambos ángulos para poder obtener la orientación absoluta del nodo. (Ilustración 5-4)

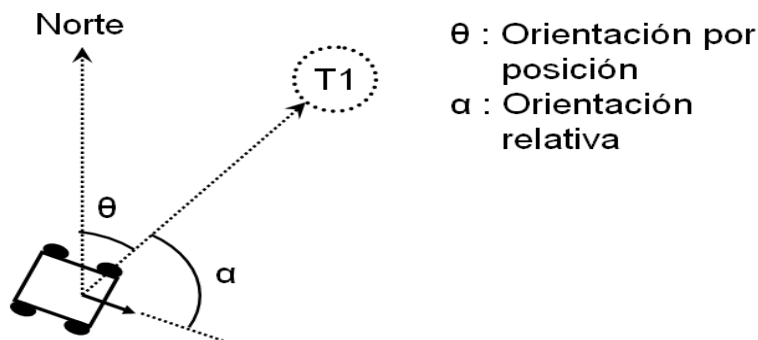


Ilustración 5-4: Orientación basada en sistemas de referencia

De entre los sistemas aquí expuestos, se optó por implementar un sistema de orientación basado en sistemas de referencia, puesto que el propio funcionamiento de nuestro sistema de localización nos proporciona no sólo la posición del nodo, sino también su orientación respecto a los transmisores, lo que permite prescindir de cualquier otro dispositivo auxiliar para el cálculo de la orientación y evita la necesidad de realizar ningún desplazamiento para obtener dicha información.

## 5.2 Orientación respecto a sistemas de referencia

El sistema para la estimación de los ángulos de recepción proporciona dos orientaciones respecto a cualquier transmisor; una orientación horizontal, que indica la orientación del nodo en el plano sobre el que se encuentran los receptores, y una orientación vertical, la cual corresponde al ángulo de recepción sobre el plano perpendicular al plano de los transmisores y que contiene al transmisor y a uno de los receptores.

Como nuestro sistema tiene como restricción que el plano de los receptores es paralelo al plano de los transmisores, si se define el norte de referencia contenido en uno de esos planos, la orientación vertical del sistema no proporciona ninguna información para el cálculo de la orientación absoluta, por lo que la propia orientación horizontal se convierte en la orientación relativa del nodo respecto al transmisor ( $\alpha$  en Ilustración 5-4).

Para calcular la orientación debida a la posición del nodo ( $\theta$  en Ilustración 5-4), necesitamos definirnos un vector ( $V_x, V_y$ ) cuyo origen son las coordenadas del nodo y cuyo fin son las coordenadas de la proyección del transmisor sobre el plano del receptor. La orientación por posición se obtiene a partir de este vector y del vector que define el norte del sistema ( $N_x, N_y$ ).

$$\cos(\theta) = \frac{V_x \cdot N_x + V_y \cdot N_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \cdot \sqrt{N_x^2 + N_y^2}}$$

Si definimos el norte como uno de los ejes de nuestro sistema de coordenadas ( $N_y=0$ ), y hacemos que el módulo del vector sea la unidad ( $N_x=1$ ), la ecuación anterior se reduce a:

$$\cos(\theta) = \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} = \frac{V_x}{d} \quad d = \text{distancia transmisor-nodo}$$

La orientación absoluta del nodo se obtiene combinando ambos ángulos.

## 6 Implementación

### 6.1 Introducción

En los capítulos anteriores se expone la base teórica en la que se basa nuestro sistema de localización y orientación. Para trasladar la idea expuesta sobre el mundo ideal al mundo físico, se pensó en una arquitectura que se adaptase a nuestro problema, intentando que fuese fácilmente escalable, que todo el proceso de localización y orientación pudiese implementarse en el propio nodo y que el coste económico del conjunto fuese reducido.

Como nuestro sistema requiere de la medición del tiempo de llegada de una misma onda de referencia entre varios puntos cercanos, se escogió la tecnología de los ultrasonidos, debido a su escasa velocidad de propagación, 340 m/s, la cual nos permitía utilizar contadores a frecuencias del orden de decenas MHz para realizar las medidas obteniendo una gran resolución. Además, al reducido coste de los transductores se ajustaba al objetivo de que el coste del sistema fuese reducido.

Como el proyecto se encontraba en una fase de prototipado, se optó por implementar toda la lógica del sistema en FPGAs. Este tipo de arquitecturas se caracterizan principalmente por la alta flexibilidad que proporcionan, adaptándose perfectamente a los posibles requisitos y problemas que pudieran surgir durante la implementación de los algoritmos antes descritos. Además, permiten ejecutar en paralelo cualquier número de tareas, lo cual facilita la implementación de los procesos encargados de la validación de la señal de ultrasonidos para cada receptor.

En la FPGA se implementó un microprocesador uBlaze, en donde se desarrollaría toda la algoritmia necesaria para la localización y orientación del nodo. Conectado a este microprocesador se creó un periférico PLB, el cual se encarga de validar la señal de ultrasonidos para cada uno de los receptores y medir los tiempos de llegada entre ellos.

Para el tratamiento de la señal de ultrasonidos (amplificación, filtrado y digitalización) se desarrolló una placa auxiliar. En esta placa se instanciaron además diferentes dispositivos que proporcionan al sistema funcionalidad extra, pudiéndose reutilizar su diseño para sistemas más complejos desarrollados para realizar tareas de navegación, mapeo, sensado,...

Para poder implementar el sistema de localización en tres dimensiones, tal y como se define en el capítulo “4.2.1.2.2 Localización 3D”, se define que el plano de referencia es aquel en donde situar los receptores (paralelo al suelo de la habitación) y un plano paralelo para distribuir las balizas (el techo de la habitación).

Por último, el transmisor se implementó en otra FPGA, la cual emitía de forma alternativa cada 100 ms. La señal generada se amplificaba mediante un driver del voltaje y se enviaba a cada uno de los transmisores.

## 6.2 Sistema transmisor

El sistema de transmisión de las señales de referencia se implementó siguiendo la arquitectura que se muestra en la Ilustración 6-1:

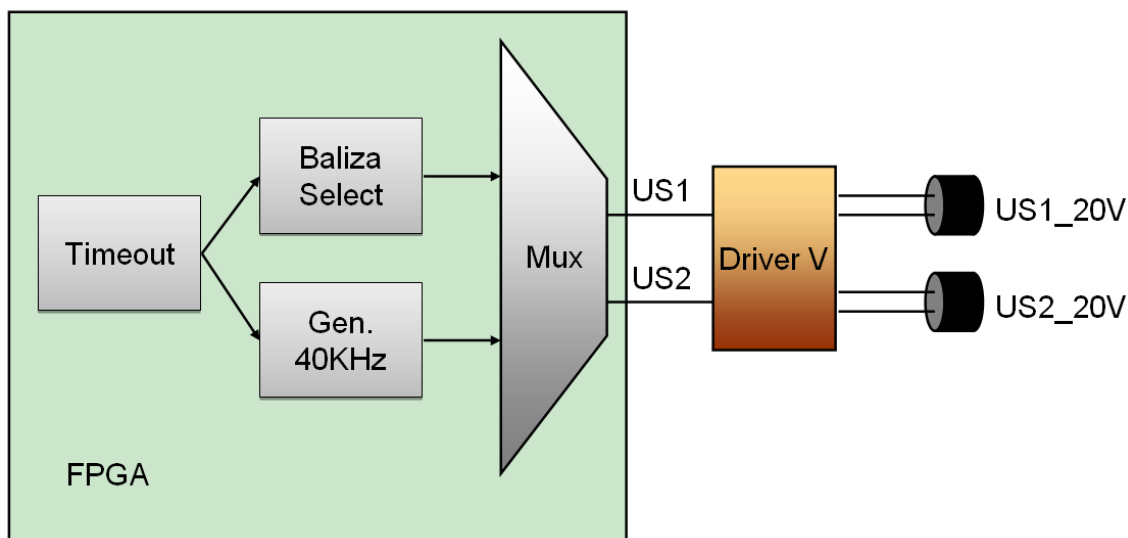


Ilustración 6-1: Arquitectura del transmisor

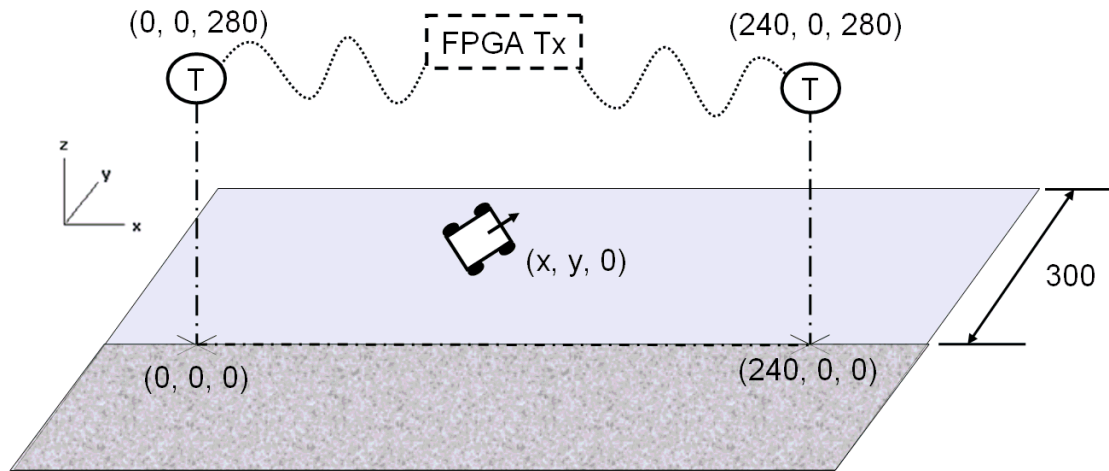
El sistema consta de dos partes principalmente, una FPGA, en donde se implementa toda la lógica necesaria para la generación de la señal de ultrasonidos y una placa auxiliar cuyo núcleo es un driver de voltaje.

La FPGA escogida es el modelo Digilent Xilinx Spartan-3 y en ella se instanciaron 3 procesos:

- Un contador (“Timeout”) que gestionaba el tiempo de guarda entre emisiones de la señal de referencia. Este contador se reinicia cada 100 ms, indicando que en ese instante que se debe cambiar de baliza emisora y que se debe generar el tren de pulsos a 40 kHz para excitar el emisor de ultrasonidos.
- Un contador cíclico (“Baliza Select”) encargado de decidir cuál es la baliza emisora, el cual se incrementa cuando el proceso “Timeout” le indica que ya ha transcurrido el tiempo de guarda establecido.
- Un generador a 40 kHz (“Gen. 40kHz”). Este proceso genera un tren de 15 pulsos a 40 kHz (frecuencia de resonancia del transmisor de ultrasonidos). Esta señal posteriormente se demultiplexa en función del valor del contador Baliza Select, dando lugar a las señales US1 y US2 de la Ilustración 6-1.

Para obtener una mayor área de cobertura, a la salida de la FPGA se conecta un driver de voltaje, modelo L293B, encargado de transformar la salida de la FPGA (3.3V) a una tensión mayor (~20 V). Esta salida amplificada (US1\_20V y US2\_20V) es la entrada de los transmisores de ultrasonidos.

Por último, los transmisores se desplegaron por el techo de la habitación, tal y como se muestra en la Ilustración 6-2:



**Ilustración 6-2: Despliegue del sistema**

El área de cobertura de cada uno de los transmisores, a la tensión a la que se les alimenta ( $\sim 20$  V), se define por una esfera centrada en el propio transmisor de unos 5 metros de radio, lo cual nos proporciona una zona en el suelo en donde las medidas son válidas para ambos transmisores de unos  $10 \text{ m}^2$ . Sin embargo, debido a la distribución de diferentes objetos en la habitación, sólo la mitad de esa área se encuentra libre de obstáculos, restringiendo nuestro sistema.

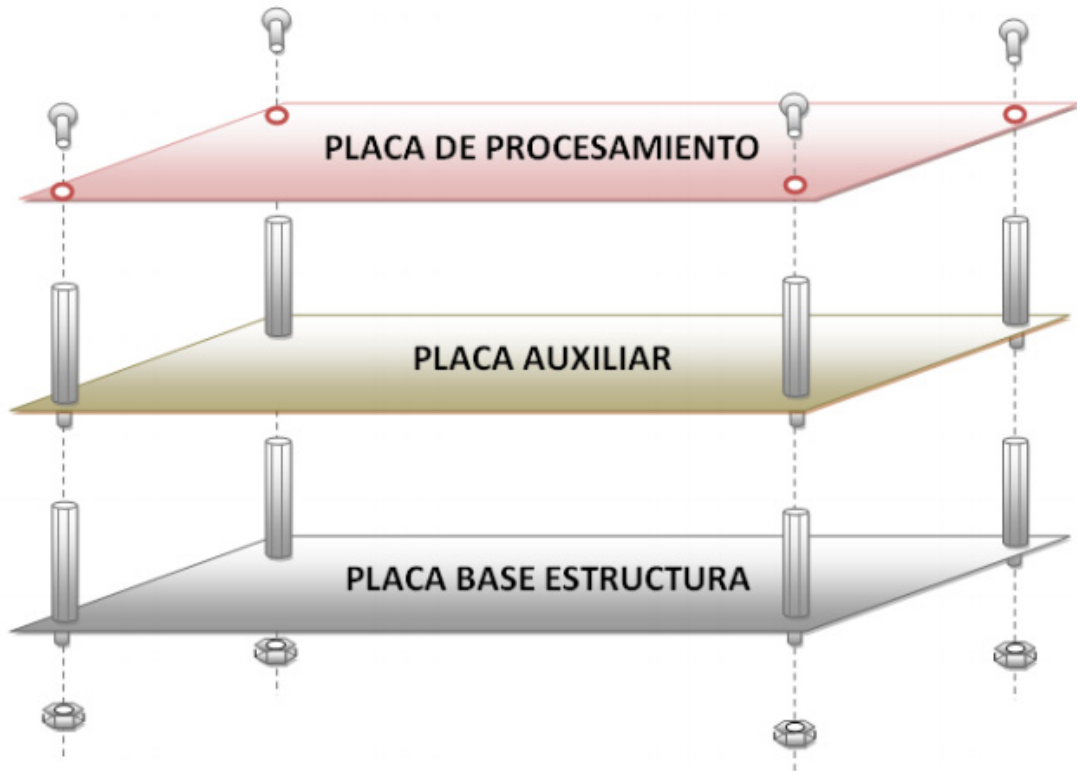
*Nota: Aunque nuestro sistema no hace uso de él, el transmisor incorpora un módulo de transmisión de radiofrecuencia, con el cual se permite implementar un sistema de localización basado en ultrasonidos siguiendo el modelo TOA.*

El sistema obtenido es un sistema modulable, sólo necesitando desplegar tantas balizas como sean necesarias para cubrir toda la región que se desee, que sigue una arquitectura pasiva, en donde un solo gestor se encarga de emitir de forma secuencial por los diferentes transmisores y permitiendo cualquier número de nodos en el sistema, siempre y cuando estos sean capaces de realizar todas las operaciones que requieran por ellos mismos. Además, se logra el objetivo de que el conjunto sea de bajo coste, debido al reducido coste de los transductores de ultrasonidos y el reducido coste computacional del agente emisor.

## 6.3 Sistema receptor

### 6.3.1 Introducción

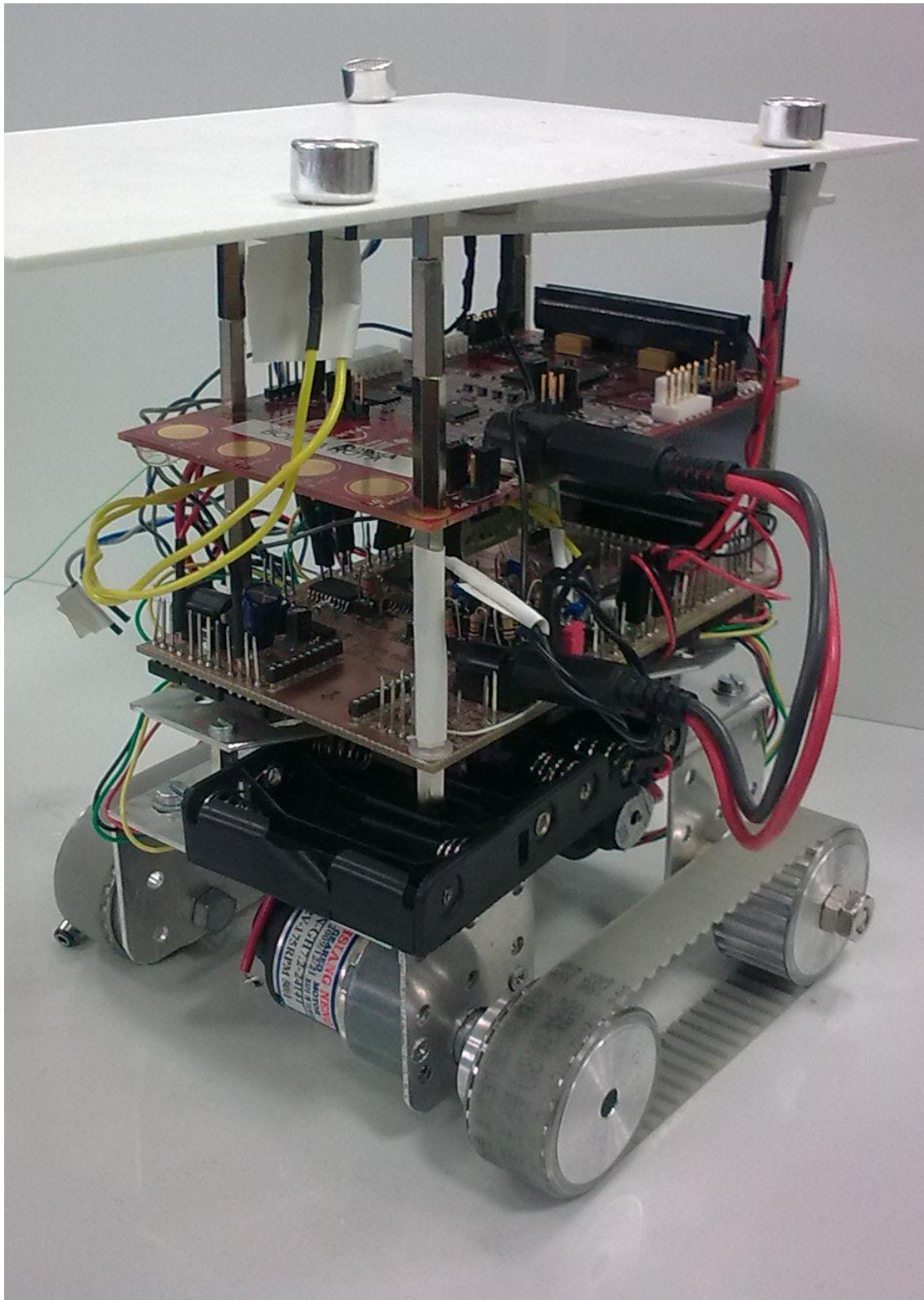
El sistema receptor se implementó en base a dos tarjetas (Ilustración 6-3):



**Ilustración 6-3: Componentes del sistema receptor**

- La primera, placa de procesamiento, contiene la FPGA modelo Avnet Spartan 3A, en donde se define toda la lógica necesaria para la medición de la diferencia de los tiempos de llegada a los receptores. Además, en esta placa se implementa el microprocesador uBlaze, el cual se encarga de gestionar el esclavo, y se instancia una UART, con la cual se establece una comunicación a través del puerto serie con un PC.
- La segunda, placa auxiliar, contiene todos los dispositivos analógicos utilizados para tratar la señal de ultrasonidos, así como otros componentes utilizados para otras funciones del robot, como drivers para motores, un módulo ZigBee, un ADC,...

Estas dos tarjetas se ensamblan en una arquitectura diseñada por Isabel Cortés de la Vega en el proyecto fin de carrera “**Robot autónomo como nodo móvil de redes de sensores**” (Ilustración 6-4)



**Ilustración 6-4: Sistema Receptor**

### 6.3.2 Placa de Procesamiento

Para la placa de procesamiento se escogió utilizar una placa ya desarrollada por la empresa Avnet. Dicha placa contiene una FPGA en la cual se instancia el microprocesador uBlaze, un microprocesador softcore reconfigurable. Junto a este microprocesador, se instancia un módulo encargado de establecer comunicación con el exterior a través del puerto serie. Esto permite realizar operaciones aritméticas dentro de la FPGA de manera sencilla, al mismo tiempo que crea un punto de entrada para establecer la comunicación con un usuario conectado en un PC (Ilustración 6-5).

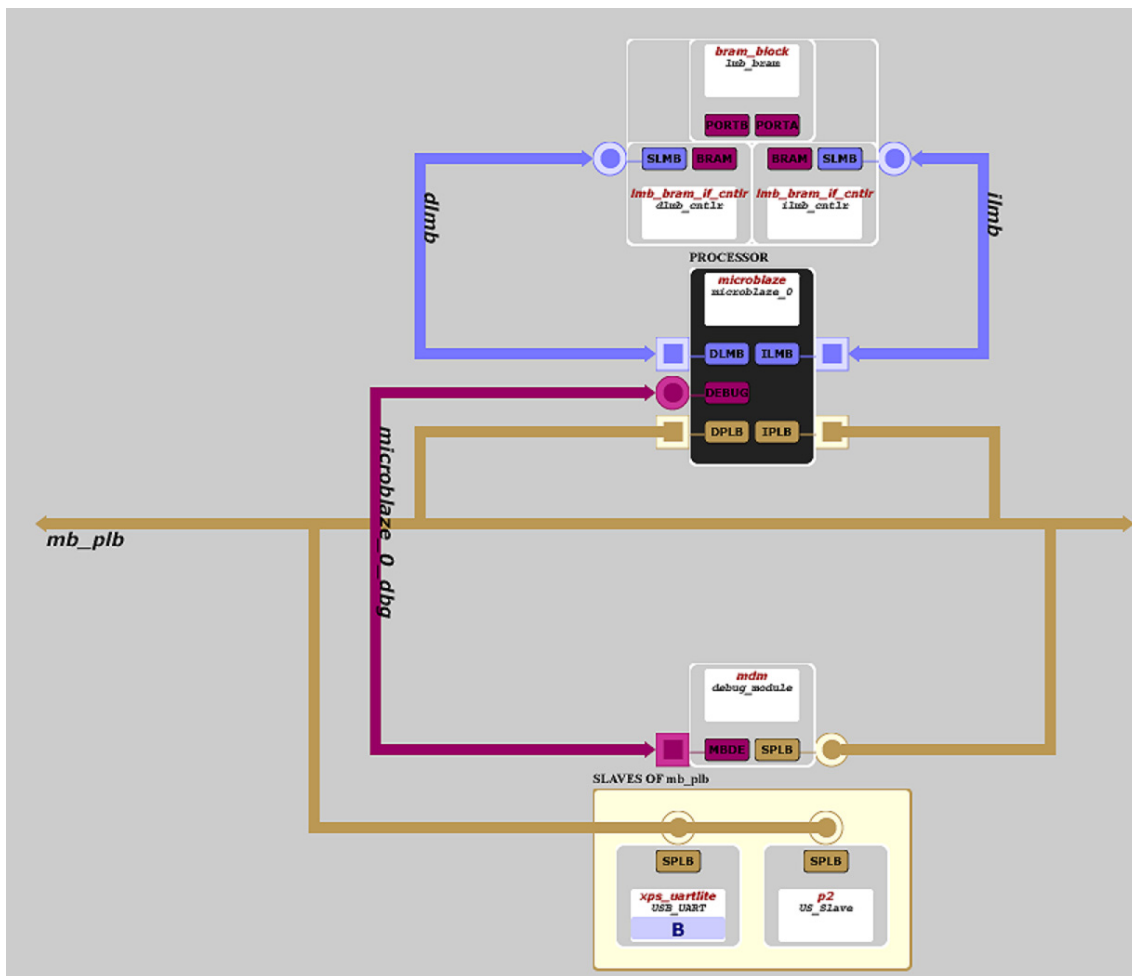
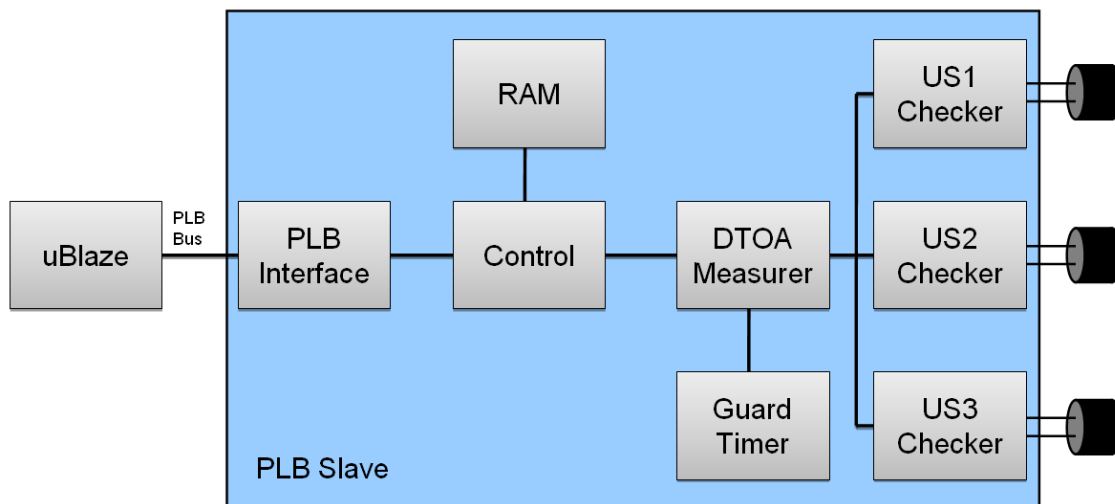


Ilustración 6-5: Arquitectura uBlaze

Para el procesamiento de las señales de ultrasonidos, se ha diseñado un esclavo con interfaz PLB, lo cual nos permite conectarlo de manera sencilla al uBlaze. Este esclavo se encarga de validar la señal de ultrasonidos y medir la diferencia entre los tiempos de recepción. Para ello, se divide el procesamiento del sistema en cuatro etapas (Ilustración 6-6):

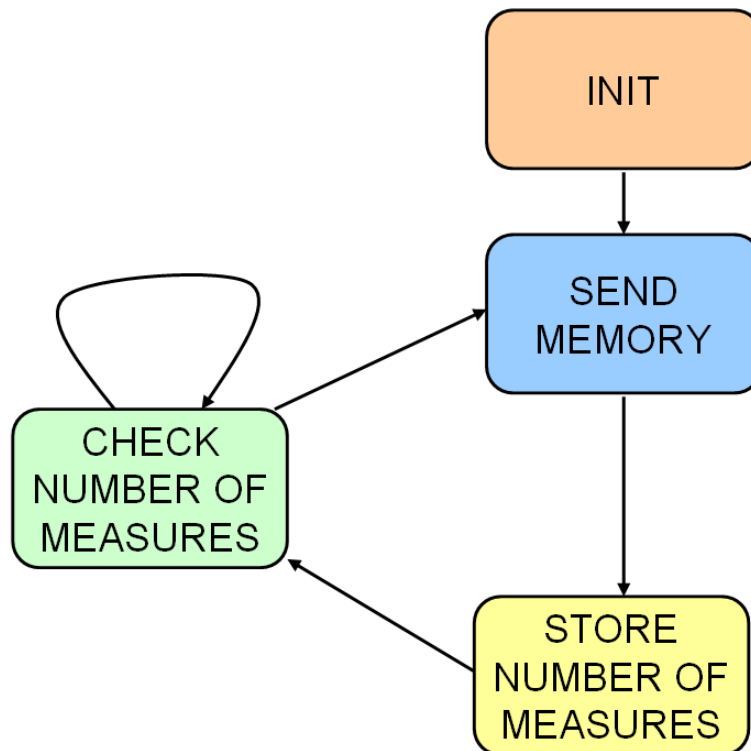




**Ilustración 6-6: Arquitectura del esclavo PLB US\_Slave**

- En la primera, la señal proveniente de los ultrasonidos pasa por un proceso de validación (“USX Checker”), el cual consta de comprobar que se reciben correctamente un tren de 10 pulsos con una frecuencia comprendida entre 20-60 kHz. Esto es necesario para reducir el ruido proveniente de la etapa analógica en donde se digitaliza la señal de ultrasonidos. Una vez la señal de ultrasonidos es validada, se activa una señal para indicar a la siguiente etapa (“DTOA Measurer”) que se ha validado la señal del correspondiente receptor.
- La segunda etapa es la encargada del proceso de medición del tiempo de llegada de la señal de ultrasonidos entre los diferentes receptores (“DTOA Measurer”). Para ello, se ha instanciado un contador que se reinicia cuando no se recibe ninguna señal de ultrasonidos. Cuando la señal de ultrasonidos es validada por el primer receptor, se activa el contador, incrementando su valor cada ciclo de reloj. Cuando el segundo receptor es validado, el valor del contador se almacena, pero este no se detiene hasta que se valida la señal de ultrasonidos en el último receptor, momento en el que se captura de nuevo el valor del contador. Las dos medidas capturadas se adaptan en función del orden de llegada (tal y como se detalla en el capítulo 3.3) y se mandan a la siguiente etapa para ser almacenadas en memoria. Cuando esta etapa termina el proceso de medición, se activa un contador (“Guard Timer”), ignorándose todas las nuevas medidas hasta que dicho contador no alcanza su valor final. Este proceso evita que se capturen los rebotes de la misma señal de referencia como nuevas medidas.
- La tercera etapa (“Control”) gestiona el acceso a la memoria RAM, almacenando en esta las nuevas medidas provenientes de la etapa 2 y atendiendo a las solicitudes provenientes del uBlaze a través de la interfaz PLB. Para ello, se ha instanciado una memoria que permite el acceso simultáneo desde dos interfaces, utilizando una de ellas para grabar las nuevas medidas, mientras que la segunda permite leerlas.
- Por último, la cuarta etapa gestiona el interfaz del PLB (“PLB Interface”), estableciendo la comunicación a bajo nivel siguiendo el protocolo PLB.

El código software cargado en el uBlaze basa su funcionamiento en el siguiente diagrama de flujo:



**Ilustración 6-7: Diagrama de flujo del código SW**

El programa arranca en el estado “INIT”, en donde inicializa todos los periféricos conectados con el uBlaze. Cuando termina con este proceso, salta al estado “SEND MEMORY”, donde hace un volcado de la memoria y la envía a través del puerto serie. Cuando termina, avanza al estado “STORE NUMBER OF MEASURES”, en donde pregunta al esclavo PLB cuantas medidas ha capturado, almacenando dicho valor en una variable interna. Tras esto, el programa entra en el proceso “CHECK NUMBER OF MEASURES” en donde realiza una espera activa, solicitando cada poco tiempo el número de medidas capturadas, hasta que dicho valor leído indique que se han obtenido tantas medidas como el tamaño de la memoria, momento en el que vuelve al estado “SEND MEMORY” y se reinicia el proceso.

Actualmente, todo el procesamiento necesario para la estimación de la localización y orientación del nodo se realiza en un PC con el fin de poder analizar mejor las medidas capturadas. Los motivos que han llevado a no introducir este cálculo en el propio código fuente de la FPGA son los errores detectados en las medidas, los cuales se detallan en el capítulo 7.

### 6.3.3 Placa Auxiliar

Para poder digitalizar correctamente la señal de ultrasonidos, es necesario realizar un proceso previo de tratamiento de señal, lo cual requería diseñar una placa que realizase este proceso de acondicionamiento, amplificación y digitalización. La necesidad de diseñar esta placa se unió a otras necesidades de otros proyectos centrados en realizar tareas de mapeo y navegación, por lo que junto a los componentes necesarios para el procesamiento de la señal de ultrasonidos se agregaron:

- Un ADC, modelo TLC3548, para facilitar el uso de cualquier tipo de sensor analógico que se requiriese en un futuro (sensores de temperatura, humedad,...).
- Un módulo de ZigBee, el cual permite establecer una comunicación serie punto a punto comunicándose mediante radiofrecuencia.
- Un driver de motores, compuesto por dos chips modelo L293D, el cual permitía aumentar la tensión y corriente de hasta cuatro señales provenientes desde la FPGA.
- Un módulo de radiofrecuencia, modelo FM-RRFQ2-433, con el cual se posibilitaba la implementación de un sistema TOA.
- Un driver de voltaje, modelo SN74LVCH16T245, el cual adaptaba el nivel de voltaje de todas las señales digitalizadas en la placa auxiliar a 5V a la tensión soportada por la FPGA (3.3V)

Junto con los componentes antes descritos, se dejaron algunos pines para desempeñar tareas como la conexión de dispositivos de infrarrojos digitales (con los cuales detectar si existen obstáculos a menos de una determinada distancia), detectar la señal proveniente de los encoders de los motores (y de este modo poder estimar cuanto se desplaza el robot sin necesidad de realizar el proceso de localización) y se dejaron algunos pines para propósito general.

La arquitectura final de la placa auxiliar se puede resumir en la Ilustración 6-8.

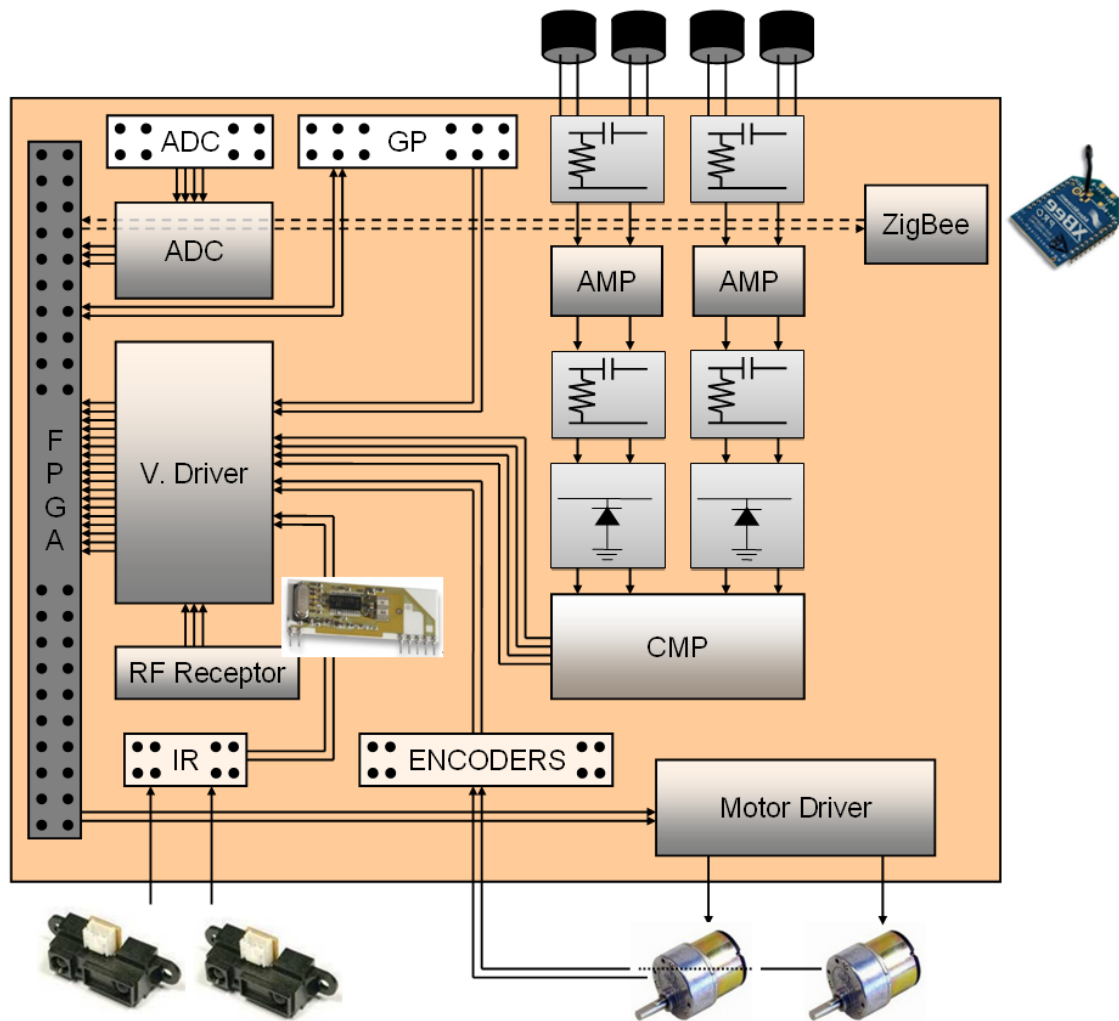


Ilustración 6-8: Arquitectura de la placa auxiliar

Tras realizar el layout y montaje de la placa, el resultado obtenido se puede observar en la Ilustración 6-9.

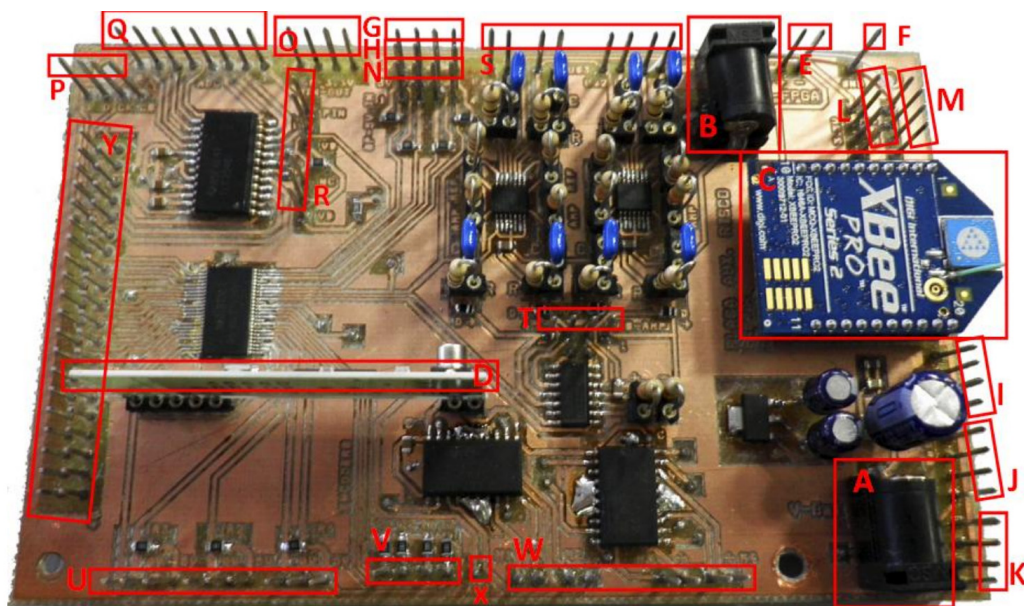


Ilustración 6-9: Placa auxiliar

En la Ilustración 6-9 se señalan, recuadrados en rojo, todos los conectores de la propia placa. En la Tabla 1 se recoge la función de cada uno de estos conectores.

**Tabla 1: Funcionalidad pines - Placa Auxiliar**

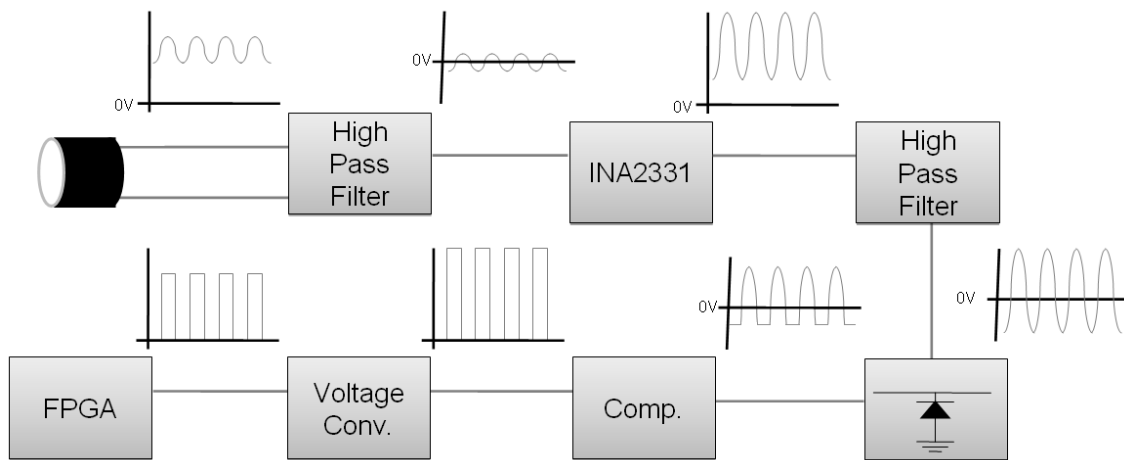
<b>PIN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
A	Jack de alimentación para el robot. Alimenta tanto la placa de procesamiento, como los motores y la placa auxiliar.
B	Jack de alimentación de la placa de procesamiento, donde se encuentra la FPGA. A este jack le llegan 5 V, provenientes de un regulador que se alimenta desde el jack de alimentación A.
C	Módulo emisor/receptor de Zigbee.
D	Conector del receptor de radio. La antena se conecta en el pin X.
E	Pines de alimentación a 0 V y 5 V.
F	Pin de conexión a tierra o GND, pensado para establecer una referencia a masa cuando se utilizan los diferentes equipos de medida.
G	Pines auxiliares con una tensión fija de 0V.
H	Pines auxiliares con una tensión fija de 5V.
I	Pines auxiliares con una tensión fija de 0V.
J	Pines auxiliares con una tensión fija igual a la tensión proporcionada a través del jack de alimentación A.
K	Pines auxiliares con una tensión fija de 5V.
L	Pines auxiliares con una tensión fija de 3.3V.
M	Pines auxiliares con una tensión fija de 2.5V.
N	Pines de entrada de propósito general para tensiones de 5V. (Pasan por el driver de tensión antes de conectarse a la FPGA)
O	Pines de propósito general conectados directamente con la FPGA
P	Pines del Bus SPI utilizado para comunicar el ADC con el SPI. Permiten aprovechar este bus para conectar otros esclavos SPI.
Q	Canales del conversor analógico digital
R	Pines de selección de entrada al canal 0 del conversor analógico digital. Permiten conectar la tensión de salida de las baterías al canal 0 del conversor analógico digital, para su lectura, o dejarlo libre para realizar medidas sobre una señal analógica externa.
S	Pines de entrada para los sensores receptores de ultrasonidos, cada receptor usa un par de pines.
T	Pines que permiten capturar las señales de ultrasonidos a la entrada del comparador.
U	Pines de entrada para sensores digitales de detección de obstáculos por infrarrojos
V	Pines de entrada para los datos provenientes de los encoders.
W	Pines de salida para la alimentación de los motores.
X	Pin para conectar la antena del receptor de radio.
Y	Pines para establecer la comunicación con la placa de procesamiento.

*Nota: La implementación de esta arquitectura, tanto el esquemático como el layout, se puede encontrar en el CD adjunto a esta memoria.*

### 6.3.3.1 Tratamiento de la señal de ultrasonidos

De toda la placa auxiliar, cabe destacar el proceso seguido para la digitalización de la señal de ultrasonidos proveniente del receptor, ya que la precisión de esta limitará en gran medida la precisión final del sistema de localización y orientación.

El receptor de ultrasonidos presenta a su salida una señal muy débil, la cual es difícilmente digitalizable. Por este motivo, es necesario introducir una etapa de tratamiento de señal. Tras numerosas pruebas y análisis de la señal digitalizada frente a la señal de ultrasonidos, se definió la siguiente arquitectura (Ilustración 6-10):

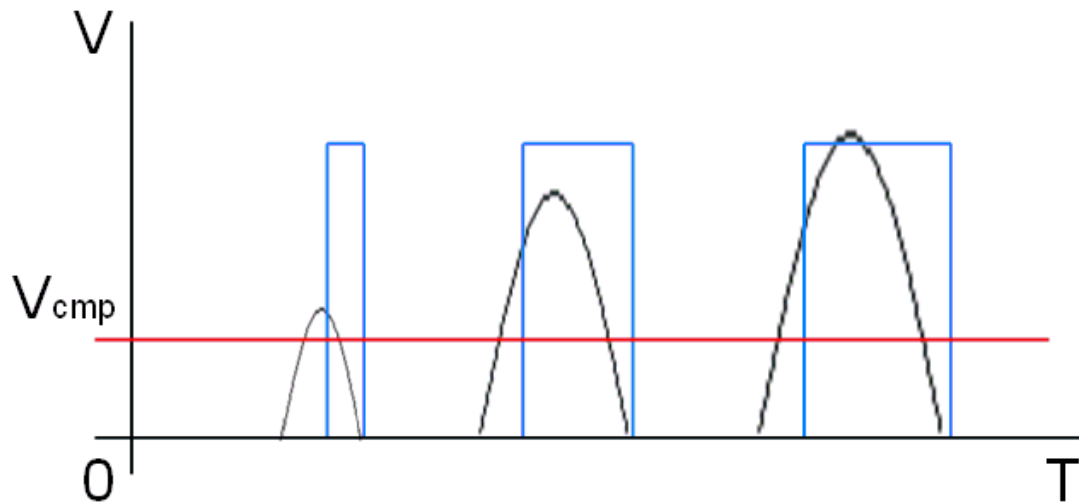


**Ilustración 6-10: Electrónica etapa de tratamiento + digitalización de la señal US**

1. La señal entregada por el transductor es filtrada por un filtro paso alto, implementado con una resistencia y un condensador, para de este modo eliminar toda componente continua de la señal y centrar la señal en 0 V.
2. La señal obtenida pasa por un amplificador instrumental, modelo INA2331, con una gran ganancia, consiguiendo separar la señal de ultrasonidos del ruido del sistema. Sin embargo, debido a la gran etapa de amplificación introducida, la señal de salida presenta una componente continua considerable, la cual es independiente para cada uno de los receptores de ultrasonidos.
3. La tercera etapa consiste en un filtro paso alto, implementado con una resistencia y un condensador. A la salida del filtro se elimina toda la componente continua de las señales provenientes de los diferentes receptores, centrando todas ellas en torno a 0V. Como la digitalización de la señal se realiza mediante un comparador, antes de poder llevar la señal al comparador es necesario eliminar toda la componente negativa de la misma, para de este modo hacer trabajar al comparador en su rango de tensión nominal.
4. La última etapa de procesamiento analógico consiste en un diodo conectado a masa antes de la entrada del comparador. La función del diodo consiste en eliminar la componente negativa de la señal a la salida del filtro, limitando el rango de la tensión a digitalizar a la zona de trabajo del comparador.
5. El proceso de digitalización se basa en utilizar un comparador, con el cual se obtiene una señal cuadrada en función de la potencia de la señal recibida en el receptor. Como la salida del comparador oscila entre 5-0V, es necesario

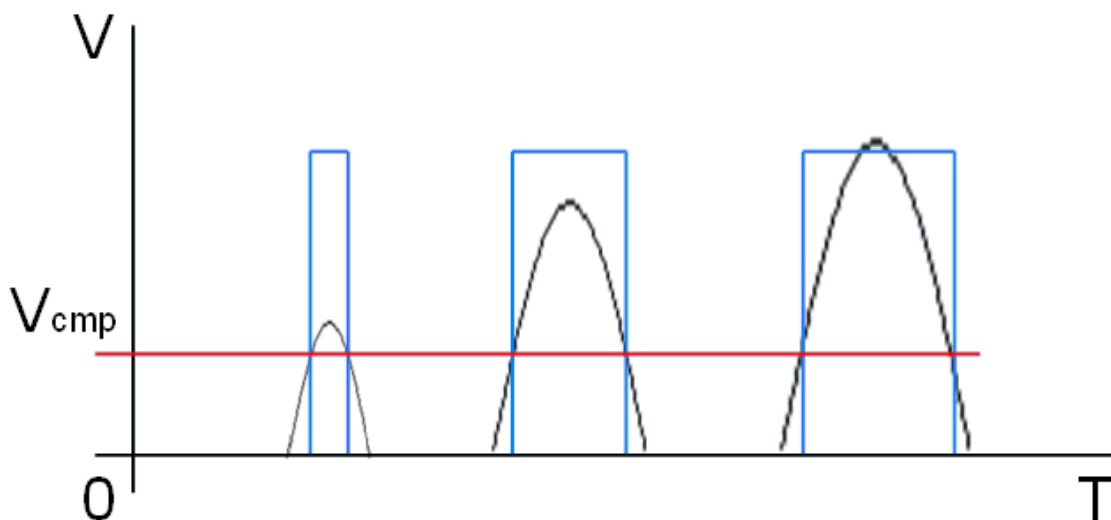
agregar un conversor de tensión al sistema, modelo SN74LVCH16T245, adaptando la señal a la FPGA.

Con esta arquitectura se realizaron numerosas pruebas y, aunque se digitalizaba correctamente la señal, el comparador (inicialmente un amplificador operacional modelo TLC2274) era demasiado lento e introducía un retardo variable en los instantes en los que la señal pasaba por el umbral de comparación, obteniendo una señal digitalizada tal y como se representa en la Ilustración 6-11:



**Ilustración 6-11: US fase de comparación 1.0**

Estos retardos introducían un error considerable a la hora de medir el desfase entre las señales provenientes de los diferentes receptores. Por este motivo, se optó por cambiar el dispositivo que actuaba como comparador por un comparador comercial, modelo TLC352. Este cambio permitió a la FPGA conocer de manera más precisa la forma de onda de la señal de ultrasonidos en cada receptor, como se muestra en la Ilustración 6-12:

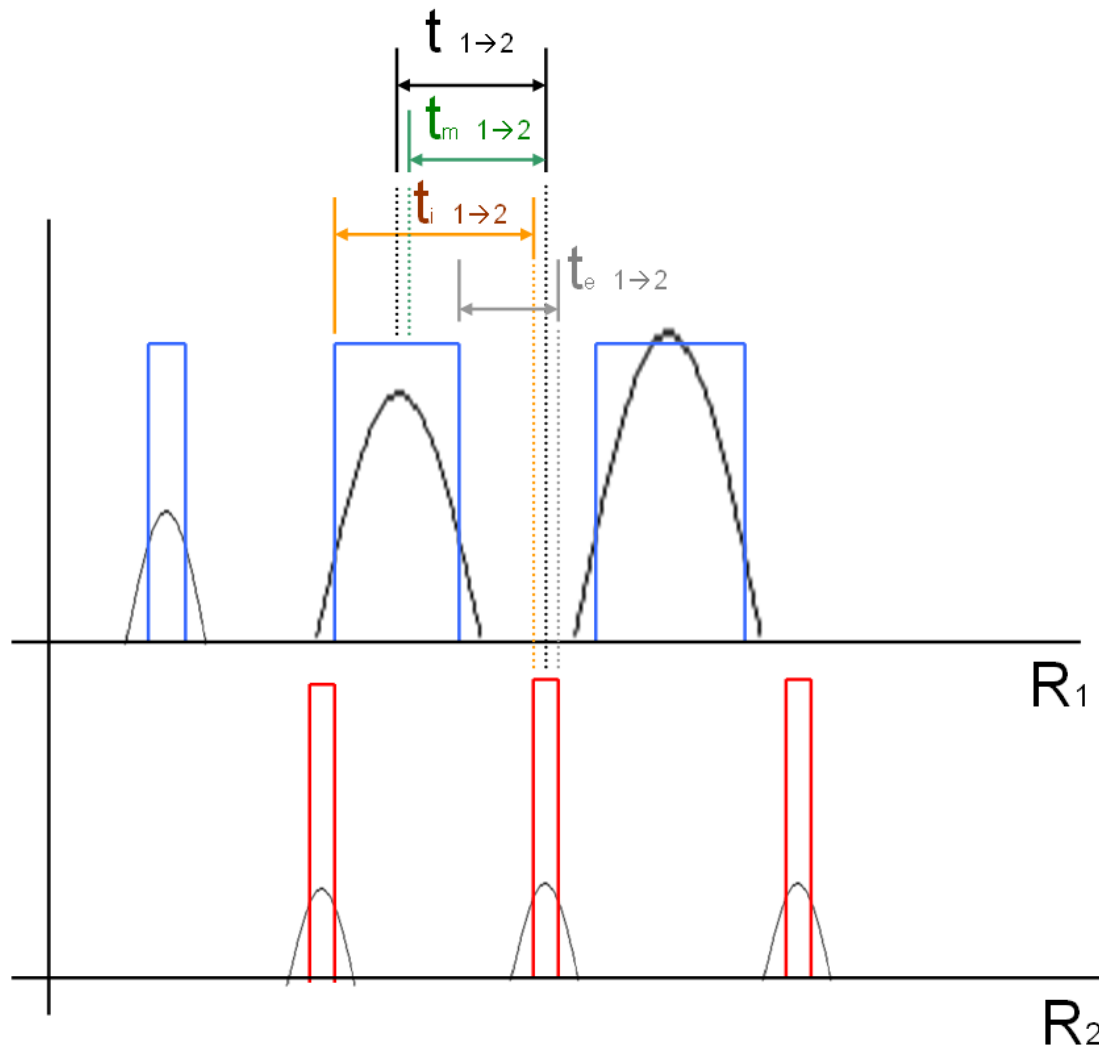


**Ilustración 6-12: US fase de comparación 2.0**

Con la nueva versión, se consiguió ajustar la señal digitalizada a la señal de ultrasonidos con un error despreciable para el sistema. Sin embargo, el ancho del pulso de la señal digitalizada sigue dependiendo de la potencia de la señal de recibida, por lo

que para medir el desfase entre dos señales de diferentes receptores se considera el punto medio del pulso, el cual se ajusta al valor máximo de la señal de ultrasonidos para ese periodo.

Este hecho se observa en la Ilustración 6-13:



**Ilustración 6-13: Medida del desfase**

En este caso, la señal en el segundo receptor es recibida de forma mucho más débil que la recibida en el primer receptor. Al basarse el sistema en medir el desfase entre ambas ondas, si considerásemos la diferencia entre los instantes iniciales ( $t_i$ ) o finales ( $t_e$ ) en los que la señal cuadrada toma valor '1', estaríamos cometiendo un error proporcional a la diferencia entre el ancho de los pulsos recibidos. Sin embargo, al considerar el punto medio del pulso en ambas señales cuadradas ( $t_m$ ), el error se reduce hasta poder despreciarse.



## 7 Análisis de fuentes de errores

### 7.1 Introducción

El sistema aquí propuesto presenta principalmente tres fuentes de errores:

- La primera fuente de error son los errores inherentes al propio sistema, los cuales se dividen en dos: el considerar que la onda, cuando alcanza al nodo, llega como una onda plana y el de considerar que la velocidad de propagación de la señal es constante. En la realidad, al no haber una distancia infinita entre el transmisor y los receptores, la onda de referencia presentará un cierto grado de curvatura, afectando más cuanto más cerca se sitúe el nodo del transmisor y/o cuanto mayor sea la distancia entre los receptores. Además, la señal de ultrasonidos viaja a una velocidad que varía en función de la temperatura del aire, por lo que al no considerar esta variabilidad estamos introduciendo otro error en el sistema.
- La segunda fuente de error es la debida a los errores que se introducen durante el proceso de captura de la señal de ultrasonidos. Idealmente, la señal sería capturada instantáneamente en cuanto esta alcanza el receptor. Sin embargo, el transductor de ultrasonidos es un piezoeléctrico con una determinada respuesta temporal, al cual está conectado un circuito compuesto por un amplificador instrumental, filtros paso alto, un comparador y un conversor de tensión, por lo que desde el instante en el que la señal se recibe en el transductor hasta que esta es capturada en la FPGA pasa un determinado tiempo, el cual puede variar para cada receptor, afectando a la medida del desfase entre las señales.
- Por último, están los errores generados durante el diseño físico del nodo y en la distribución de las balizas del sistema emisor. Se ha detectado que pequeños errores en la distancia entre los receptores, en la definición del ángulo recto que forman los receptores entre sí, así como errores en el paralelismo entre el plano de los receptores y el plano de los transmisores, afectan al proceso de estimación de los ángulos de recepción.

En este capítulo se analizan todas estas fuentes de errores y su grado de impacto al sistema de estimación de ángulos.

*Nota: En el análisis de los errores, se ignora la componente imaginaria que aparece en las coordenadas obtenidas, en algunos puntos del mapa, durante el proceso de localización al realizar la raíz cuadrada del algoritmo descrito en el capítulo 4.2.1.2.1.*

## 7.2 Errores inherentes al sistema

Los errores inherentes al sistema se dividen en dos grupos: el primero es el error al considerar que la onda de ultrasonidos llega al nodo como una onda plana, cuando realmente presenta un cierto grado de curvatura, mientras que la segunda fuente de error es la debida a aproximar la velocidad de propagación del sonido como una constante, cuando esta depende de la temperatura a la que se encuentre la sala.

El error debido a considerar la onda recibida como una onda plana se asume para reducir el coste computacional del algoritmo, y de esta forma poder implementarlo en dispositivos de bajo coste (microcontroladores, por ejemplo). Sin embargo el efecto de este limita la distancia máxima a la que se pueden encontrar los receptores, afectando de manera significativa al proceso de diseño mecánico del robot.

El error introducido por considerar la onda recibida como una onda plana se aprecia en la Ilustración 7-1:

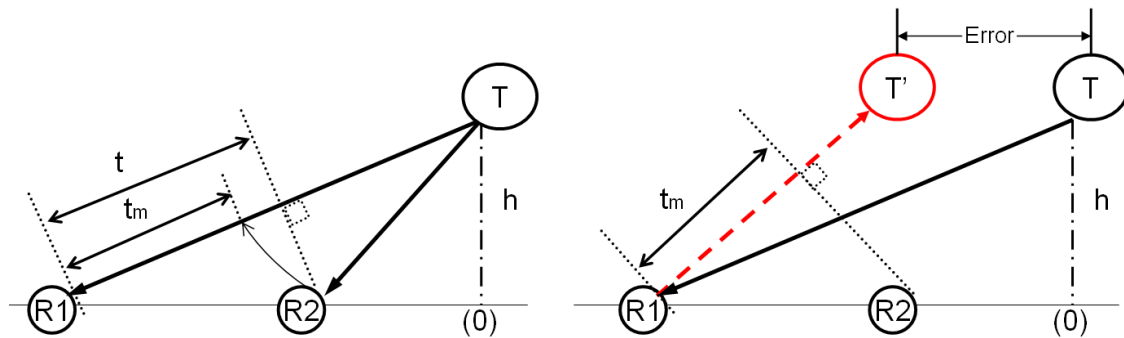


Ilustración 7-1: Error por onda no plana 1D

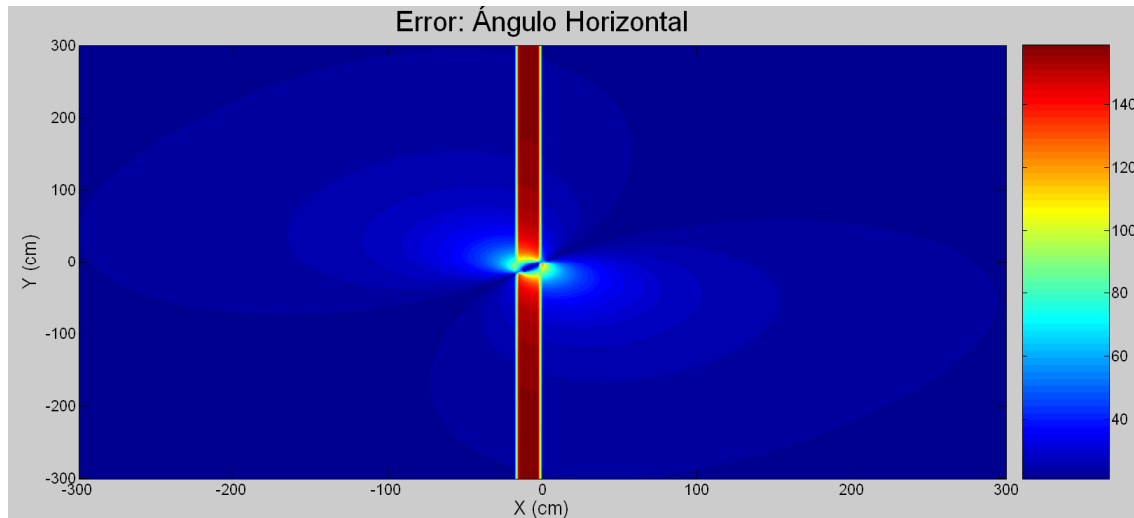
Al considerar que la onda alcanza el sistema como una onda plana, estamos considerando que el tiempo transcurrido entre la recepción de ambos receptores ( $t_m$ ) es el mismo que el tiempo que transcurriría si la onda fuese realmente plana ( $t$ ), lo cual nos lleva a un error en la estimación del ángulo receptor, que termina afectando a la estimación del lugar donde se encuentra el transmisor, lo que produce un error en la estimación de la posición y orientación del nodo. Este error se caracteriza por ser mayor cuanto mayor sea la relación entre la distancia entre receptores y la distancia al propio transmisor.

A continuación se muestran los resultados de una simulación sobre este efecto. Las condiciones de simulación son las siguientes:

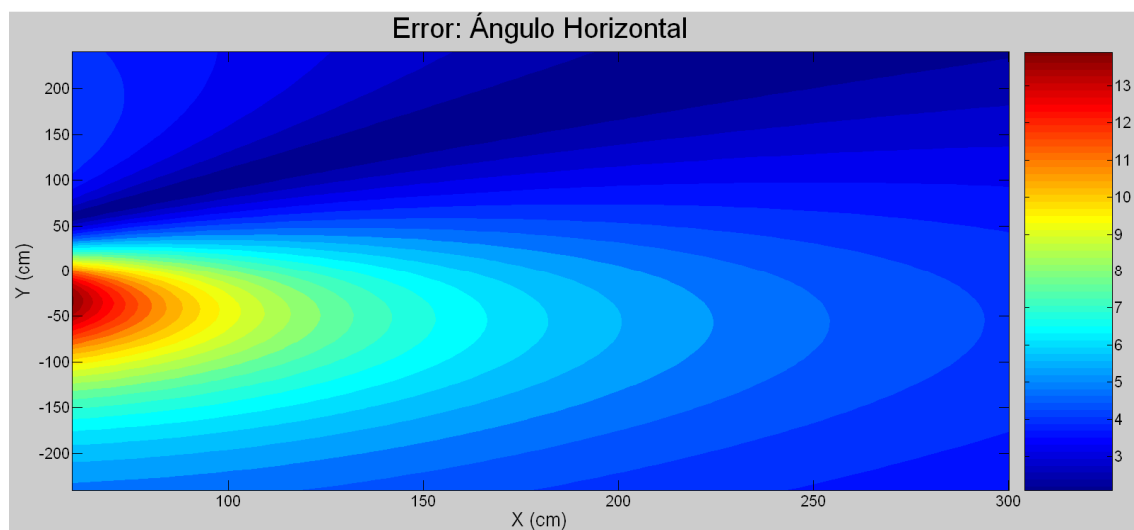
Transmisor 1: (0, 0, 280)  
Transmisor 2: (300, 0, 280)  
Distancia entre receptores ( $\Delta$ ): 30  
Receptor referencia: (x, y, 0)  
Receptor auxiliar 1: (x +  $\Delta$ , y, 0)  
Receptor auxiliar 2: (x, y +  $\Delta$ , 0)

*Nota: Todas las medidas están en cm*

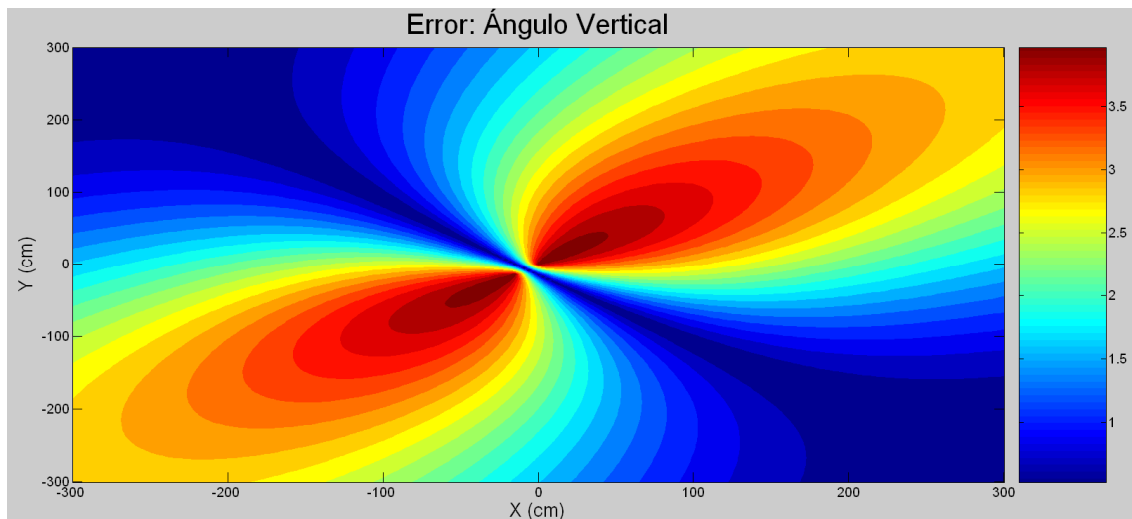
El error en el cálculo del ángulo de recepción horizontal y vertical sólo depende de la distancia del nodo respecto del transmisor y de su orientación relativa a este, por lo que en las primeras simulaciones sólo se tiene en cuenta el transmisor 1, obteniendo los errores que se muestran en la Ilustración 7-2 y en la Ilustración 7-4:



**Ilustración 7-2: Error onda plana - Ángulo Horizontal (grados)**



**Ilustración 7-3: Error onda plana - Zoom ( $x = 60 \rightarrow 300$ ) Ángulo Horizontal (grados)**



**Ilustración 7-4: Error onda plana - Ángulo Vertical (grados)**

Analizando el error en el ángulo horizontal, se observa una franja que cruza por el transmisor en donde el error es mucho mayor que en el resto del mapa. Este hecho es debido a que al estar la coordenada X del transmisor comprendida entre dos de los receptores que el nodo utiliza para estimar la componente en X de la dirección de propagación de la onda de referencia, la medida capturada no es representativa. El ancho de esta franja es la mitad de la distancia a los transmisores.

El error también es mayor justo debajo del transmisor. Este error se debe a que la onda de referencia no llega a todos los receptores con la misma dirección de propagación, por lo que de nuevo las medidas capturadas no son representativas.

En el resto de los puntos del mapa, el error horizontal decrece cuanto más nos alejamos del transmisor. Además, se observa una importante componente de error relativa a la orientación del nodo respecto al transmisor. Esto se aprecia en que cuando el receptor de referencia es el primero o el último en capturar la onda de referencia, el error se reduce, mientras que si captura la señal de referencia entre los receptores auxiliares el error se incrementa. Este efecto es debido a la propia disposición geométrica de los receptores.

Si hacemos zoom en la parte del mapa que abarca (30, Y) hasta (300, Y), podemos ver en más detalle el error horizontal en las zonas "válidas" del mapa (Ilustración 7-3).

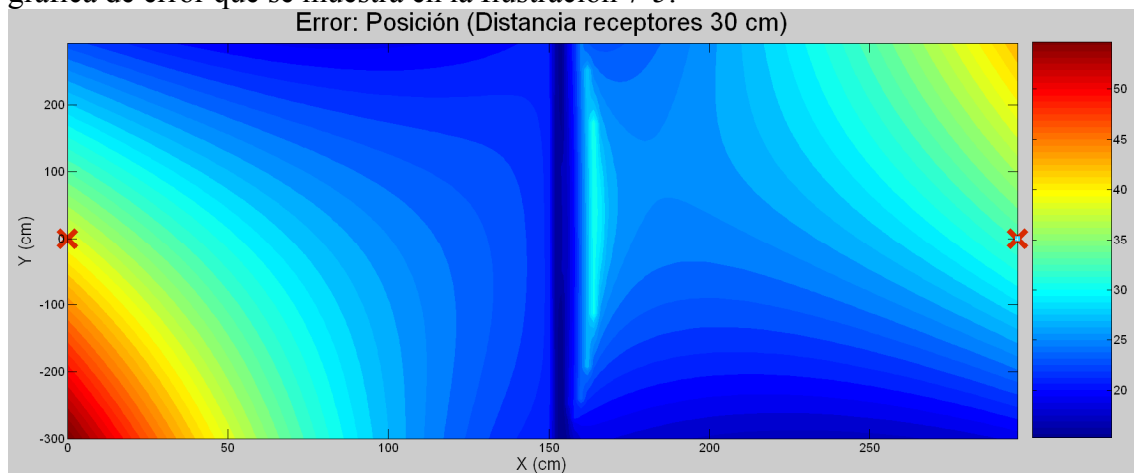
El error en esta zona siempre es menor que  $15^\circ$ , y el error tiende a reducirse conforme el nodo se aleja del transmisor.

Este efecto hay que tenerlo en cuenta a la hora del cálculo de la orientación horizontal del nodo. Como nuestro sistema siempre necesita de dos transmisores para obtener la posición del nodo, podemos calcular la orientación respecto a ambos, lo cual unido a la posición estimada por el nodo, permite al sistema conocer la región de la Ilustración 7-2 en la que se encuentra el robot, por lo que puede elegir entre estas dos regiones, descartando aquella en la que los errores sean mayores.

En el caso del ángulo vertical, el error es debido principalmente a la distribución geométrica de los receptores. Al igual que en el caso anterior, los errores tienden a disminuir a medida que nos alejamos del transmisor, pero difiere en las zonas de mayor error, siendo estas cuando la onda de referencia alcanza primero o por último al receptor de referencia.

Los errores en el cálculo del ángulo vertical repercuten directamente en el error de localización del nodo y a priori es imposible eliminar este error de forma analítica, y a diferencia del ángulo horizontal, al sólo existir dos transmisores, no podemos escoger qué transmisor presenta una región más fiable.

Volviendo al caso en estudio, si realizamos el proceso de localización con las medidas estimadas para la distribución dada de receptores y transmisores, obtenemos la gráfica de error que se muestra en la Ilustración 7-5:

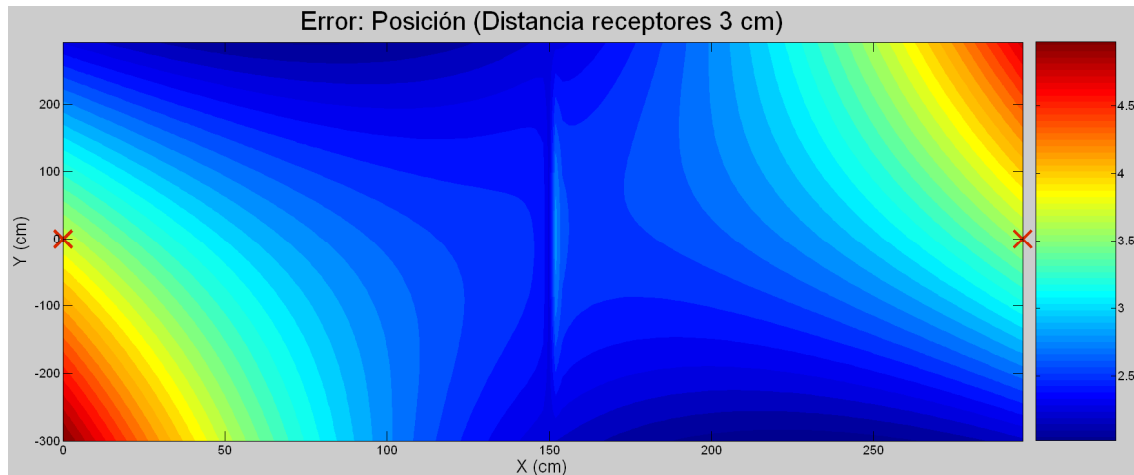


**Ilustración 7-5: Error onda plana – Localización (cm) (Dist. Receptores = 30 cm)**

La gráfica obtenida indica que el error es bastante elevado para algunos puntos del mapa (llegando a superar los 50 cm), lo cual demuestra el efecto importante que supone este error en la precisión de nuestro sistema.

Para reducir este error, sólo existen dos alternativas: o se aumenta la distancia existente entre el transmisor y el nodo, o se reduce la distancia entre los receptores. Como aumentar la distancia entre el transmisor y el nodo es difícil (los transmisores tienen un alcance limitado, existen las restricciones de la sala en donde se instala el sistema,...) la única alternativa factible es la de reducir la distancia entre los receptores.

Si en este mismo ejemplo, reducimos la distancia entre receptores de 30 cm a 3 cm, y volvemos a calcular los errores de localización del nodo en todos los puntos del mapa, obtendríamos la gráfica de la Ilustración 7-6.



**Ilustración 7-6: Error onda plana – Localización (cm) (Dist. Receptores = 3 cm)**

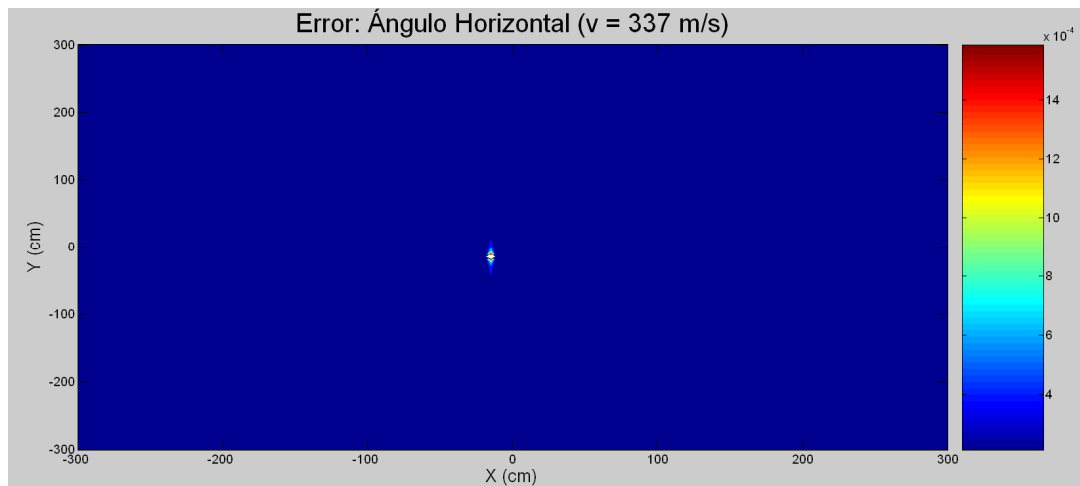
Como se puede apreciar, las regiones con mayores y menores errores son semejantes en ambos casos, sin embargo se ha reducido el error del sistema más de un 90% (siendo para cualquier punto del mapa menor que 5 cm). Esto nos lleva a la conclusión que cuanto menor sea la distancia entre los receptores, mayor será la precisión del sistema. Sin embargo, cuanto más reduzcamos la distancia entre los receptores, menor serán las medidas de diferencia de distancia que capturemos, lo que repercute en un mayor error debido a otras fuentes de error (las cuales se analizan en los apartados 7.3 y 7.4) por lo que es necesario llegar a un compromiso entre distancia de receptores y errores ajenos al sistema.

La otra fuente de error inherente a nuestro sistema es la debida a la aproximación que realizamos con la velocidad de propagación de la señal de ultrasonidos, la cual se puede expresar como:

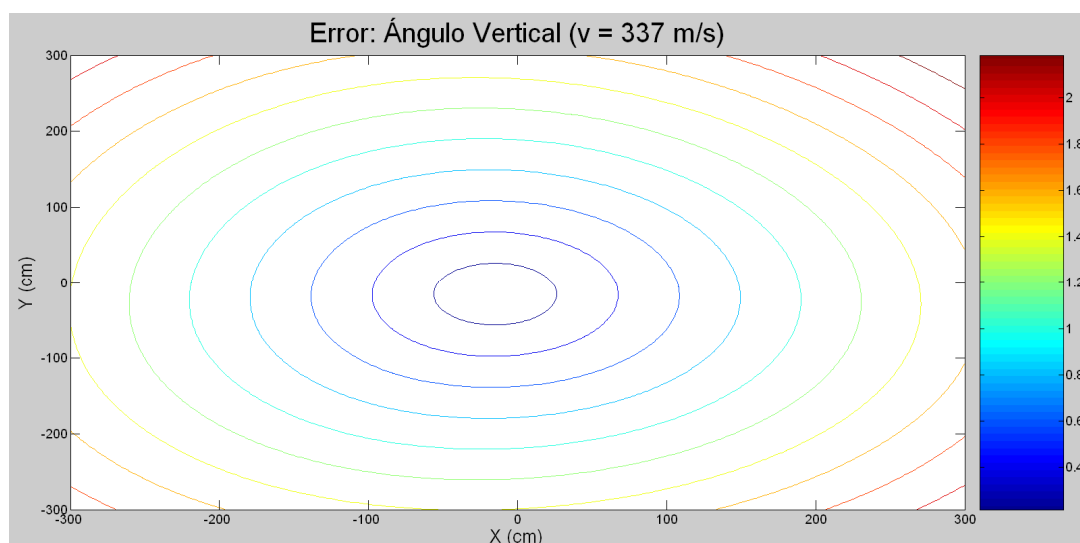
$$v = 331,5 \frac{m}{s} + 0,6 \frac{m}{s} \frac{1}{^{\circ}C}$$

Si estimamos que la temperatura de la sala en donde se va a desplegar el sistema varía entre 10 °C y 34 °C, obtenemos que la velocidad de propagación del sonido varía entre 337 m/s y 352 m/s. En nuestro sistema, se estima que la temperatura de la sala se encuentra a 22 °C, lo cual implicaría que la onda de ultrasonidos viaja a 345 m/s.

Si analizamos el error en el cálculo del ángulo horizontal y vertical que se produciría por utilizar esta velocidad, cuando la temperatura de la sala está a 10 °C obtenemos las siguientes gráficas (Ilustración 7-7 y Ilustración 7-8):



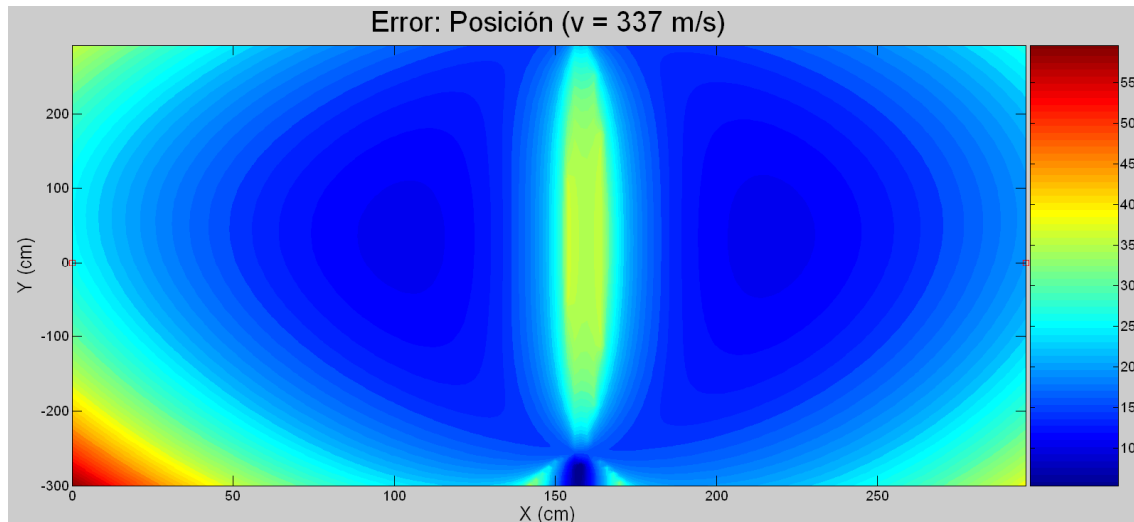
**Ilustración 7-7: Error velocidad - Ángulo Horizontal (grados)**



**Ilustración 7-8: Error velocidad - Ángulo Vertical (grados)**

*Nota: Este error no tiene en cuenta el error producido por considerar la onda de referencia como onda plana*

De estas gráficas se deduce que el error en la estimación de la velocidad de propagación es despreciable para el cálculo de la orientación horizontal del nodo (el error introducido es menor que  $0,0001^\circ$  para cualquier punto del mapa salvo justo debajo del transmisor), pero que sin embargo tiene un efecto perjudicial en la estimación del ángulo vertical cuanto más nos alejamos del transmisor. Este error acarrea un error en el algoritmo de localización, que se traduce en la imagen de la Ilustración 7-9:



**Ilustración 7-9: Error velocidad – Localización (cm)**

*Nota: Este error no tiene en cuenta el error producido por considerar la onda de referencia como onda plana*

Esto demuestra la importancia de una correcta estimación de la velocidad de propagación de la señal de ultrasonidos para el sistema de localización. En este ejemplo, un error del 3.5% en la estimación de la velocidad de propagación del sonido acarrea errores de hasta 60 cm en el proceso de localización.

Concluyendo, los errores inherentes en el sistema se reducen si la distancia entre receptores frente a la distancia al transmisor es despreciable y la precisión será mayor cuanto mayor sea la capacidad de sistema para conocer la velocidad de propagación de la señal de referencia.



### 7.3 Errores generados durante el tratamiento de la señal de referencia

Desde que la onda de ultrasonidos llega al transductor, hasta que esta es capturada por la FPGA, la señal pasa por un proceso de adaptación y digitalización. Este proceso de tratamiento de la señal analógica introduce un retardo en la señal, el cual dependerá de la respuesta temporal de los transductores y del resto de componentes analógicos utilizados. Como la señal de ultrasonidos se captura en tres puntos diferentes, existen tres caminos hasta que la señal es capturada por la FPGA, por lo que aunque idealmente el retardo debería ser idéntico para todos los casos, esto no es así, ya que los componentes por los que pasa la señal son diferentes.

Tras analizar uno a uno los componentes utilizados, se detectó que la principal fuente de incertidumbre se producía en los transductores de ultrasonidos, los cuales presentan una respuesta dependiente de la dirección de recepción de la señal de ultrasonidos (Ilustración 7-10).

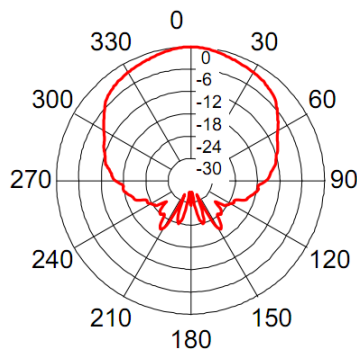


Ilustración 7-10: Beam Angle del receptor de ultrasonidos

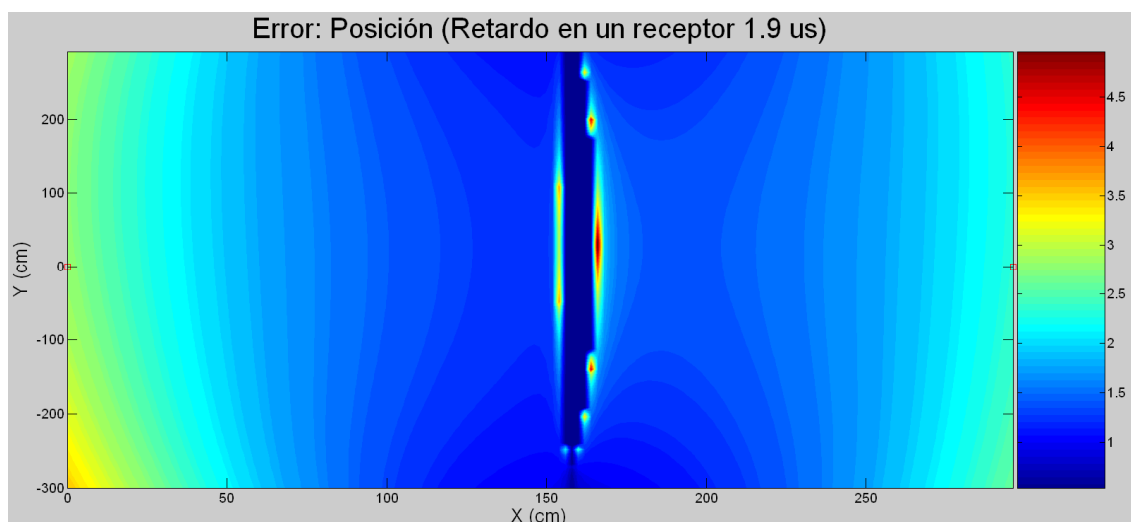
Este efecto se observa en el “*beam angle*” (grado de sensibilidad del transductor relativo a la dirección de propagación de la onda de ultrasonidos). Como se puede apreciar, la señal de ultrasonidos se captura con mayor intensidad cuanto más alineados estén el transmisor y el receptor. Esta intensidad afecta directamente al tiempo de respuesta del receptor de ultrasonidos. Cuando una señal es capturada por un receptor de ultrasonidos, esta no es entregada directamente a la salida con una tensión “constante”, sino que la propia señal hace entrar al transductor en un proceso de resonancia (fase denominada de excitación) que va incrementando la señal entregada a la salida desde 0V hasta unos pocos milivoltios. Cuanto mayor sea la intensidad en el receptor, más corta será la fase de excitación del receptor y más rápido se propagará la señal de ultrasonidos a la siguiente etapa de procesado.

Como el nodo dispone de tres receptores situados en diferentes posiciones, la señal de ultrasonidos llegará a cada receptor con un determinado ángulo, lo cual conlleva que la duración de la etapa de excitación sea distinta para cada receptor, lo que hace que el retardo desde que la señal alcanza al transductor hasta que es capturada por la FPGA varíe considerablemente para cada uno de los receptores.

*Nota: este efecto se acentúa si los receptores no presentan la misma orientación en el plano que los define.*

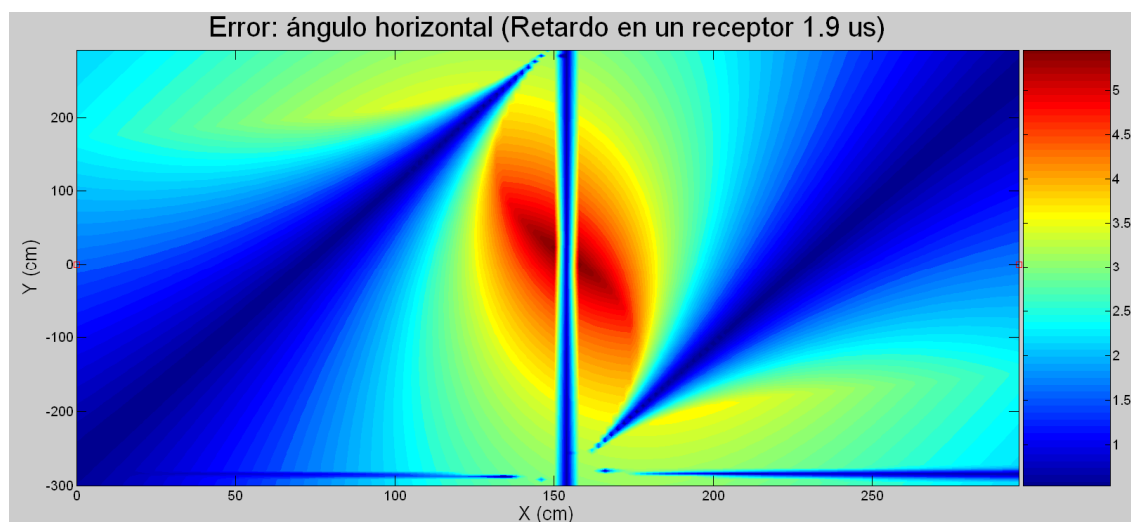
Este problema se puede apreciar en el siguiente ejemplo:

Si la fase de excitación de uno de los receptores es 1,9  $\mu$ s más lenta que la del resto, conllevará que la FPGA mida incorrectamente la distancia desde que la señal de referencia es recibida en dicho receptor hasta que es recibida en el resto, lo que acarreará una incorrecta estimación del ángulo vertical, y por consiguiente, un error al aplicar el algoritmo de localización (Ilustración 7-11)



**Ilustración 7-11: Error localización (cm) - Retardo variable (distancia receptores 30 cm)**

Este error afecta también al cálculo de la orientación horizontal del nodo, efecto que se observa en la Ilustración 7-12.

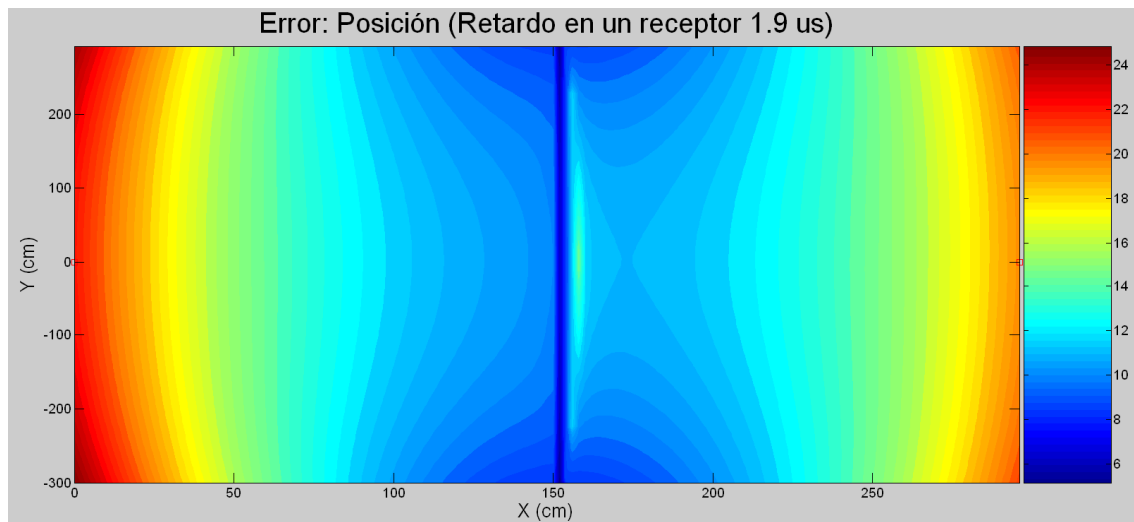


**Ilustración 7-12: Error ángulo horizontal (grados) - Retardo variable (distancia receptores 30 cm)**

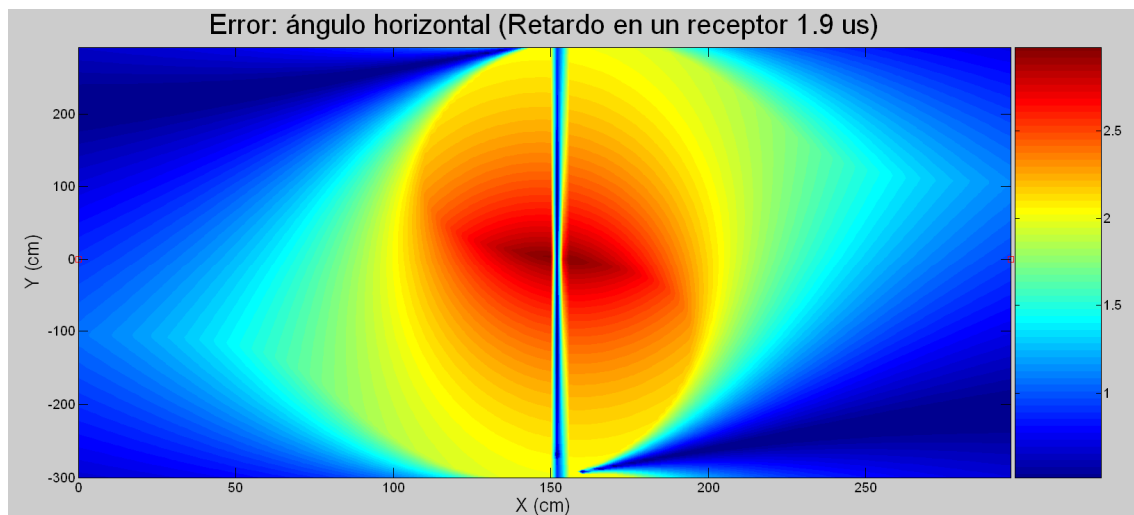
*Nota: en la Ilustración 7-12 el resultado que se muestra es el mejor resultado tras el cálculo de la orientación horizontal respecto a ambos transmisores.*

Este tipo de error se caracteriza por verse afectado por la distancia existente entre los receptores. Esto es debido a que como el error es constante, el efecto que tiene cuando las medidas que se capturan son grandes es menor que cuando las medidas son pequeñas, hecho que depende directamente de la distancia entre los receptores. De este modo, si el mismo factor de error lo trasladamos al caso en que la distancia entre los

receptores es de 3 cm, los errores obtenidos son los que se muestran en la Ilustración 7-13 y en la Ilustración 7-14:



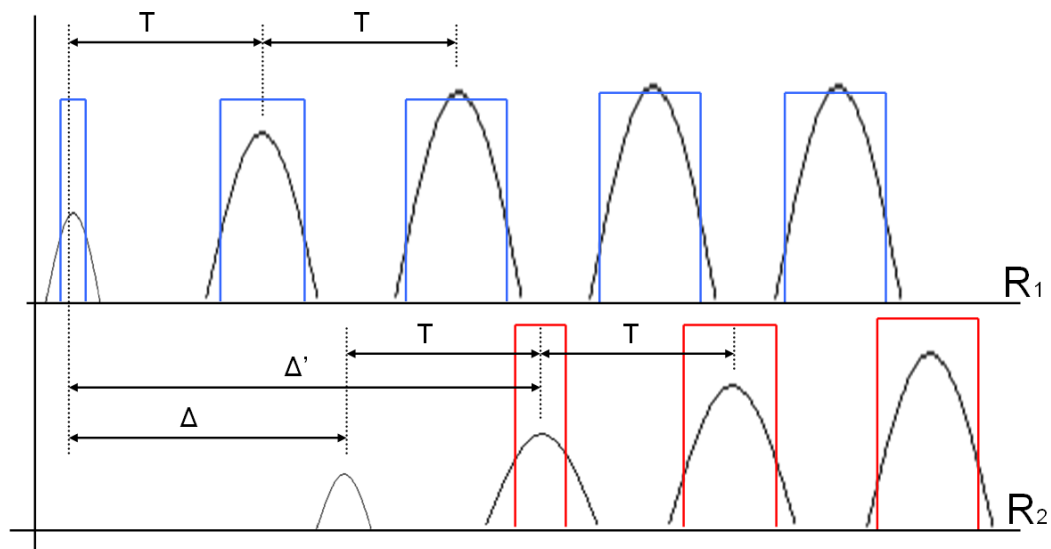
**Ilustración 7-13: Error localización (cm) - Retardo variable (distancia receptores 3 cm)**



**Ilustración 7-14: Error ángulo horizontal (grados) - Retardo variable (distancia receptores 3 cm)**

Analizando el caso del error en la orientación horizontal se observa que al reducir la distancia entre los receptores la distribución de la fuente de error tiende a concentrarse y el error máximo llega a disminuir. Este efecto es debido a que al reducir la distancia entre los receptores, este error tiende a compensarse. Sin embargo, en el caso del cálculo de la posición del nodo se observa que, aunque la distribución del error es semejante a la del caso anterior, el error aumenta para todas las posiciones considerablemente.

Otro efecto que se aprecia es que, al no capturarse la onda de ultrasonidos con la misma intensidad en todos los receptores, la FPGA puede percibir la señal de ultrasonidos desfasada un número múltiplo del periodo de la misma (Ilustración 7-15).



**Ilustración 7-15: Error fase digitalización**

Durante la fase de digitalización, se compara la señal analógica con una tensión umbral para decidir cuando la señal es ruido y cuando no lo es. Como la señal de cada receptor no llega con la misma intensidad, la fase de excitación puede ser más o menos duradera para cada receptor, por lo que puede ocurrir que en uno de los receptores, el pulso N de ultrasonidos ya supere ese umbral, mientras que para otro receptor no sea hasta el pulso  $N \pm K$  cuando el umbral se supere. Esto repercutirá en que el sistema considerará la medida errónea ( $\Delta'$  en la Ilustración 7-15) como si se tratase de una válida ( $\Delta$  en la Ilustración 7-15), generando un error semejante al observado en la Ilustración 7-11, pero con un factor elevadísimo (equivalente a  $K \cdot T$ )

Este error se ve afectado por la distancia existente entre los receptores. Así, cuanto mayor sea la distancia entre estos, mayor será la diferencia en la orientación de la señal de ultrasonidos en cada receptor, por lo que más probable será que se de este efecto.

Para reducir estas fuentes de error es necesario ser muy rigurosos durante la fase de diseño del circuito de adaptación de la señal de ultrasonidos, intentando elegir componentes lo más semejantes entre sí. Además, hay que tener en cuenta la distancia entre los receptores para intentar reducir el error que más nos afecte en cada caso.

Otra opción que reduciría estas fuente de error sería la de sustituir el circuito de adaptación de la señal de ultrasonidos por un ADC (convertor analógico-digital) para de este modo ser capaces de operar directamente con la señal analógica y simplificar los diferentes caminos que llegan a la FPGA. El problema que plantea esta solución es que el ADC debe ser capaz de operar a altas frecuencias, para de este modo ser capaces de medir de forma precisa el desfase entre las diferentes señales, lo cual incrementa el coste del dispositivo, por lo que al final esta solución se descartó.

*Nota: el error debido a medir con un desfase del periodo de la señal de ultrasonidos puede reducirse por software si el nodo conoce su posición en el instante anterior. Al introducir esta fuente de error un error muy elevado, pueden descartarse aquellas medidas que dan lugar a posiciones demasiado alejadas de la posición inicial y corregir las medidas capturadas en múltiplos del periodo de la señal de ultrasonidos para conocer la nueva posición del nodo.*

## 7.4 Errores generados por imprecisiones de la estructura mecánica

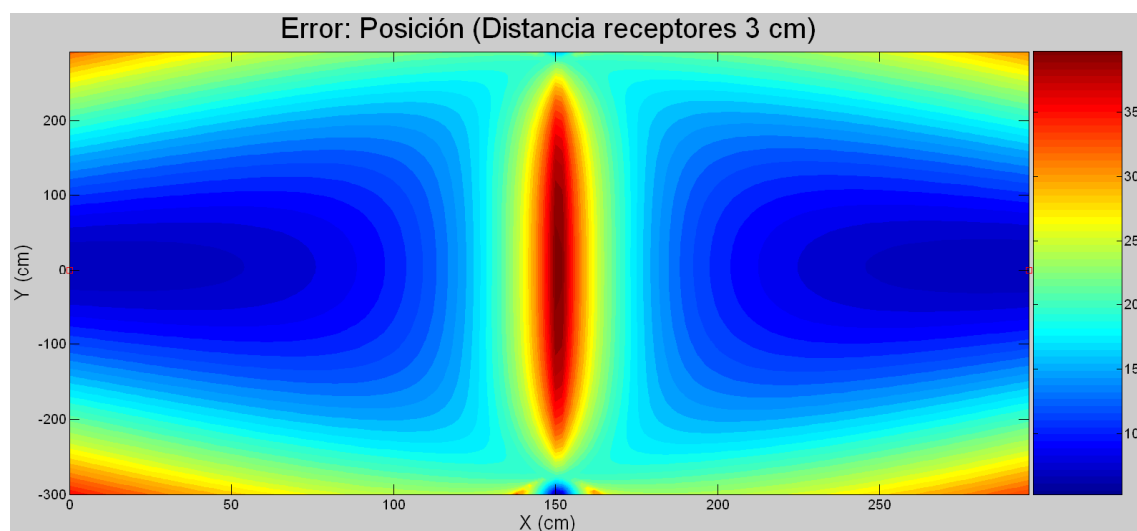
La base de la que parte nuestro sistema de localización y orientación es que el plano en el que se definen los transmisores debe ser paralelo al plano en donde se definen los receptores. Además, el razonamiento que hemos seguido para el cálculo de la orientación y posición del nodo partían de la base de que la distancia entre los dos receptores auxiliares y el receptor de referencia es idéntica y que estos se distribuyen en los vértices de un triángulo rectángulo. Sin embargo, al implementar el sistema es imposible que todos estos requisitos se cumplan, existiendo pequeños errores en la distancia entre los receptores, la distribución de los mismos o el plano en el que están definidos (el cual no es paralelo al plano de los transmisores). En este apartado se trata de analizar estos efectos en el sistema.

Si consideramos que uno de los receptores auxiliares se encuentra a una distancia de ‘a’ cm del receptor de referencia, mientras que el otro se sitúa a una distancia ‘a+Δ’, las distancias capturadas al medir la onda plana se verán afectadas. Por ejemplo:

Si consideramos que ‘a’ = 3 cm y ‘Δ’ = 0,1 cm entonces los receptores se situarían en:

$$\begin{aligned}\text{Receptor de referencia} &= (X, Y, 0) \\ \text{Receptor auxiliar 1} &= (X + a + \Delta, Y, 0) \\ \text{Receptor auxiliar 2} &= (X, Y + a, 0)\end{aligned}$$

El sistema generaría un error durante el proceso de localización igual al observado en la Ilustración 7-16.



**Ilustración 7-16: Error localización (cm) – Diferencia en distancia entre receptores auxiliares (3 cm)**

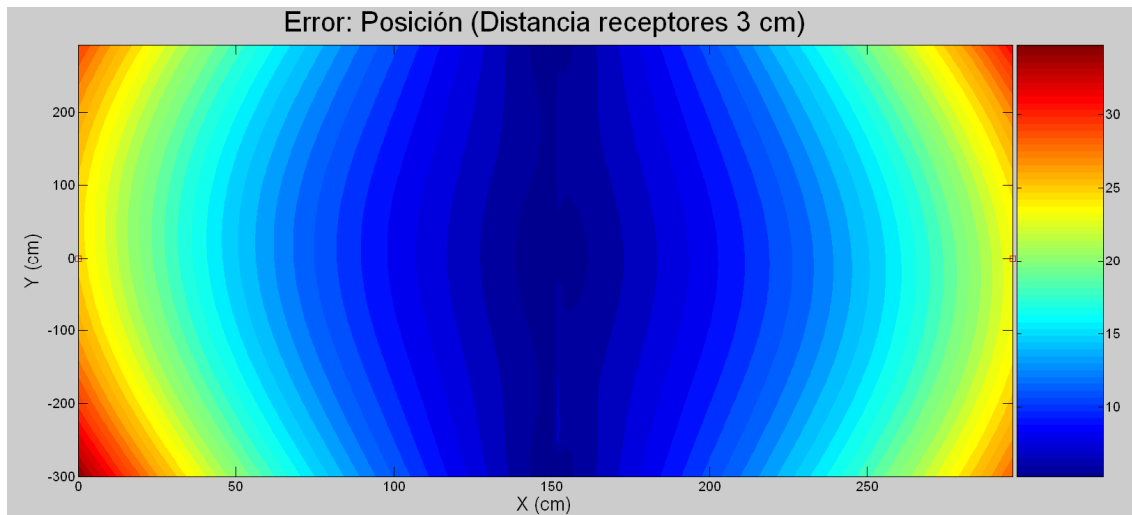
Como se puede apreciar, una pequeña variación en la distancia entre los receptores repercute en una elevada tasa de error en el algoritmo de localización, la cual es mayor cuanto mayor sea la distancia respecto a cualquier transmisor.

La siguiente fuente de error a considerar es la de no distribuir los receptores formando un ángulo recto perfecto. Al igual que en el caso anterior, este error repercute en una incorrecta estimación de las distancia capturadas, lo que afecta en la precisión del sistema de localización. Por ejemplo:

Si consideramos que ' $a$ ' = 3 cm y ' $\Delta$ ' = 0,1 cm entonces los receptores se situarían en:

Receptor de referencia = (X, Y, 0)  
 Receptor auxiliar 1 = (X + a, Y +  $\Delta$ , 0)  
 Receptor auxiliar 2 = (X, Y + a, 0)

El sistema generaría un error durante el proceso de localización igual al observado en la Ilustración 7-17.



**Ilustración 7-17: Error localización (cm) – Error en la distribución de los receptores auxiliares (3 cm)**

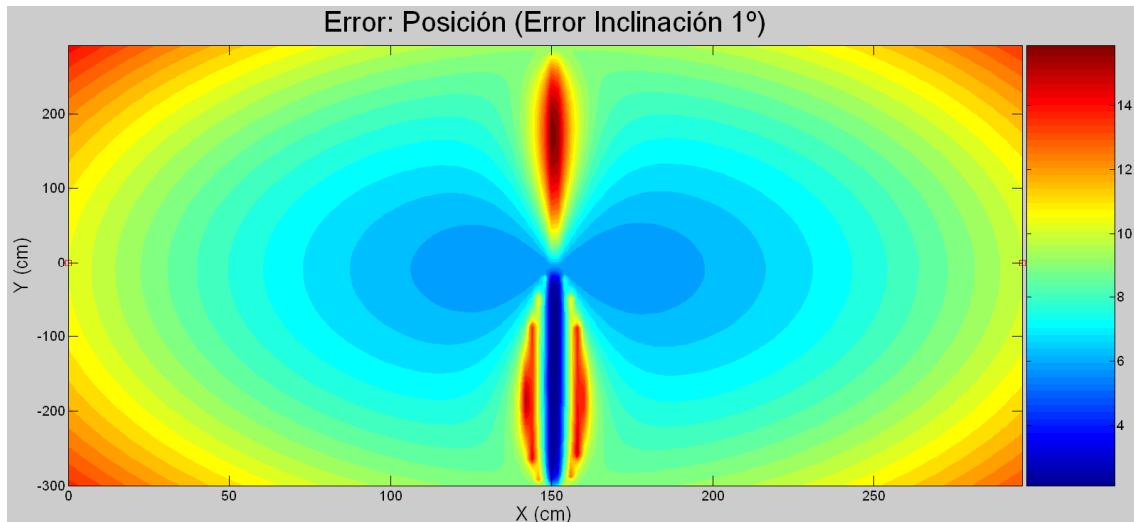
Al igual que en el caso anterior, se observa que pequeñas variaciones en la distribución de los receptores acarrear grandes errores en el proceso de localización.

Por último, falta por analizar el error de no distribuir los receptores en un plano paralelo al de los transmisores. Este error se refleja como un offset ( $\theta$ ) en el ángulo vertical capturado, afectando de manera negativa al proceso de localización del nodo. Por ejemplo:

Si consideramos que ' $a$ ' = 3 cm y el plano de los receptores está 1° desviado respecto del plano de los transmisores:

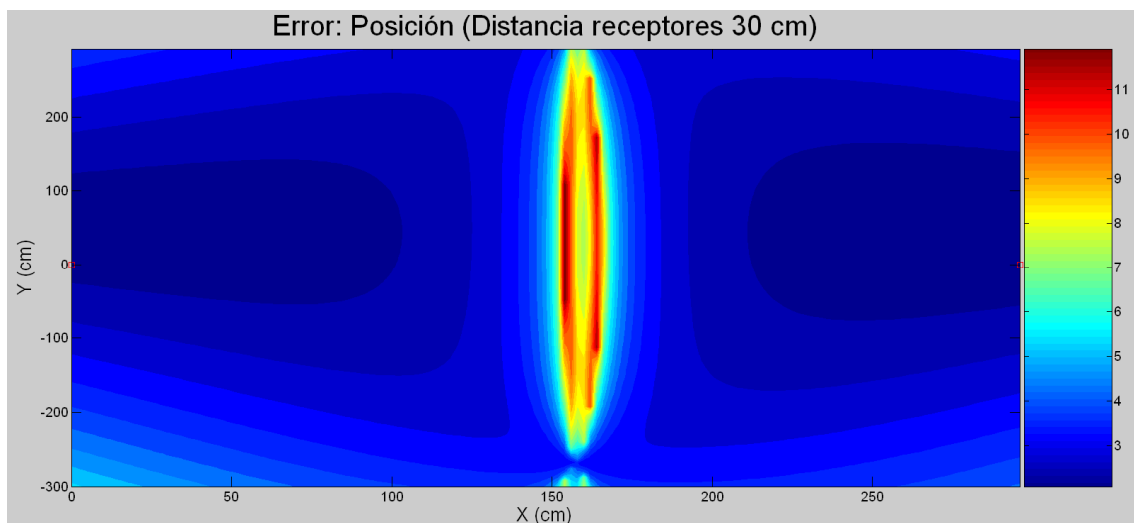
Receptor de referencia = (X, Y, 0)  
 Error por inclinación ( $\Delta$ ) =  $a \cdot \text{seno}(\theta) = 3 \cdot \text{seno}(1) = 0,05$  cm  
 Receptor auxiliar 1 = (X + a, Y,  $\Delta$ )  
 Receptor auxiliar 2 = (X, Y + a, 0)

El sistema generaría un error durante el proceso de localización igual al observado en la Ilustración 7-18.

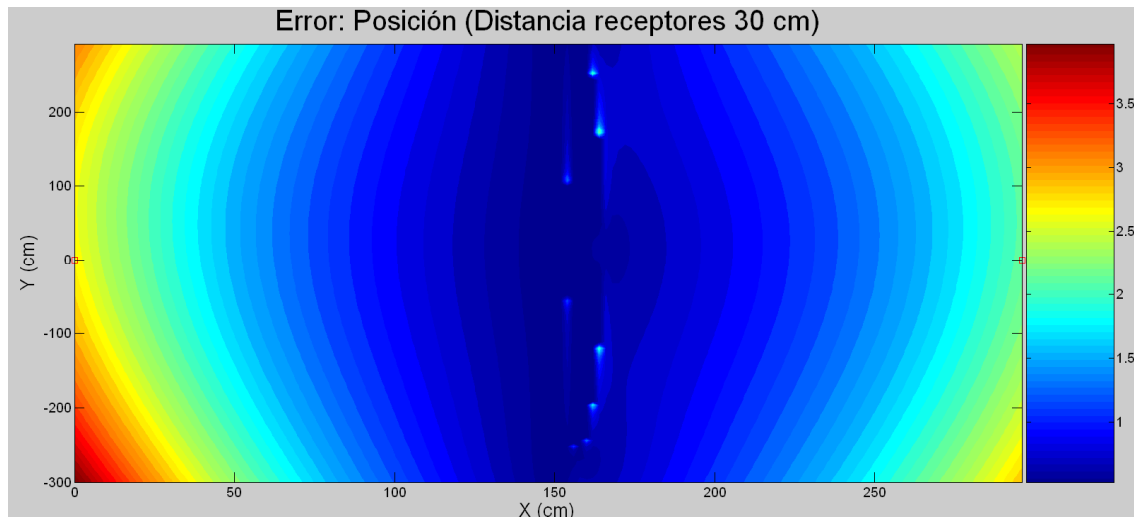


**Ilustración 7-18: Error localización (cm) – Error en la inclinación del plano de los receptores**

Este análisis indica que el sistema es extremadamente sensible a la incorrecta distribución de los receptores. Para reducir estas fuentes de error, lo único que se puede hacer es incrementar la distancia entre los receptores. Esta medida atenúa el error, como se puede observar en las gráficas de la Ilustración 7-19 y la Ilustración 7-20:



**Ilustración 7-19: Error localización (cm) – Diferencia en distancia entre receptores auxiliares (30 cm)**



**Ilustración 7-20: Error localización (cm) – Error en la distribución de los receptores auxiliares (30 cm)**

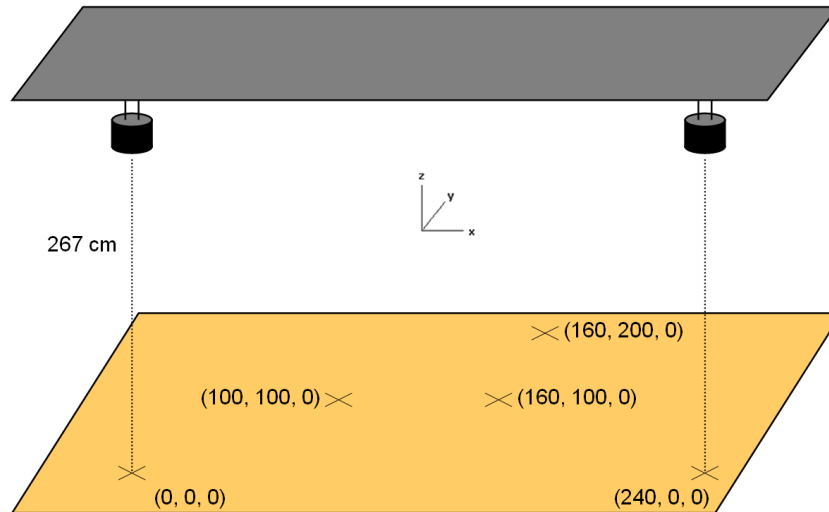
Para reducir el error debido a la inclinación en el plano de los receptores, incrementar la distancia entre estos no afecta al error, ya que el offset en la estimación del ángulo vertical se aplica de igual manera en ambos casos. La única solución pasaría por disponer de un dispositivo auxiliar (un inclinómetro por ejemplo) en el propio plano de los receptores. Con este dispositivo, el nodo es capaz de conocer su inclinación exacta, pudiendo eliminar el offset de las medidas capturadas. Además, gracias a esta modificación, se elimina la restricción de que el sistema sólo pueda aplicar los algoritmos de localización y orientación cuando el nodo se sitúa de forma paralela con el plano de los transmisores, puesto que puede adaptar las medidas capturadas para aplicar el algoritmo descrito en el capítulo 4.2.



## 8 Resultados

### 8.1 Introducción

Para medir la precisión de nuestro sistema de localización y orientación, desplegamos al robot en tres puntos del mapa (Ilustración 8-1):



**Ilustración 8-1: Puntos de medida**

Los transmisores se situaron a una distancia de 240 cm entre ellos, a una altura de 267 cm del plano de los receptores. Se definió como posición (0, 0, 0) del mapa la proyección de uno de los transmisores sobre el plano de los receptores y el eje de coordenadas X como la línea que une ambos transmisores. En el robot se instalaron 3 receptores de ultrasonidos, situando a 3 cm los receptores auxiliares del receptor de referencia.

En cada uno de estos puntos se orientó al robot de cuatro formas diferentes. Si definimos como norte del sistema el vector (-1, 0, 0), el robot estaría orientado respecto dicho norte a 0°, 90°, 180° y 270° en cada punto. Con esto se consigue analizar el impacto de la orientación del robot en el cálculo de la posición y orientación del mismo. Para cada orientación y posición se tomaron 45 medidas, las cuales se analizaron en un PC.

El proceso de estimación de la precisión del sistema consistía en:

1. Capturar 45 medidas respecto a ambos transmisores
2. Adaptar las medidas capturadas para eliminar el error producido por capturar la señal de referencia un número múltiplo del periodo de la señal de ultrasonidos.
3. Obtener la orientación horizontal y vertical respecto a ambos transmisores
4. Calcular la posición del nodo con los datos obtenidos.

*Nota: Se decidió no considerar el error debido a capturar la señal un número de periodos de ultrasonidos más tarde en alguno de los receptores debido a que dicho error repercute en un error inmenso en el cálculo de la posición del nodo, enmascarando el resto de errores.*

## 8.2 Medidas Capturadas

Para descartar el error debido a capturar alguna de las señales un múltiplo del periodo de la señal de ultrasonidos más tarde, se realizó una estimación teórica con las diferencias de medidas que se capturarían si se desplegara el nodo en las posiciones antes indicadas con cada orientación definida. Este procedimiento permite obtener el punto del mapa en el cual se localizaría el robot si sólo existieran errores por considerar la onda recibida como una onda plana. Las distancias relativas obtenidas se utilizan como medidas de referencia, adaptando las medidas capturadas en el robot a estas sumando/restando el periodo de la señal de ultrasonidos.

*Nota: El sistema de estimación de distancias relativas implementado en la FPGA trabaja a 52 MHZ, por lo que si el periodo de la señal de ultrasonidos es de 25 us, el factor de adaptación a aplicar en las medidas capturadas es de  $\pm 1300$  pulsos.*

Aplicando este procedimiento, el número de veces que se ha aplicado el factor de adaptación en las 45 medidas relativas a cada transmisor en todas las posiciones y orientaciones del mapa se resume en la Tabla 2. En esta tabla se muestran 4 columnas para cada grupo de medidas. En la primera, se referencia el número de casos por factor de adaptación para la diferencia de distancias relativas entre el primer receptor auxiliar y el receptor de referencia ('D1') cuando emite el primer transmisor ('TX1'). En la segunda, el efecto sobre la distancia capturada entre el segundo receptor auxiliar y el receptor de referencia ('D2') cuando emite el primer transmisor. La tercera y la cuarta columna muestran el factor de adaptación cuando emite el segundo transmisor ('TX2'):

**Tabla 2: Factor de corrección (pulsos) en las medidas capturadas (número de casos)**

Medida	Adap. TX1 D1	Adap. TX1 D2	Adap. TX2 D1	Adap. TX2 D2
100-100 0°	0 ----- 3	0 ----- 40	0 ----- 41	0 ----- 43
	1300 ----- 41	1300 ----- 5	1300 ----- 4	1300 ----- 2
	2600 ----- 1	2600 ----- 0	2600 ----- 0	2600 ----- 0
100-100 90°	0 ----- 29	0 ----- 28	0 ----- 17	0 ----- 37
	1300 ----- 16	1300 ----- 17	1300 ----- 28	1300 ----- 8
	2600 ----- 0	2600 ----- 0	2600 ----- 0	2600 ----- 0
100-100 180°	0 ----- 7	0 ----- 37	0 ----- 42	0 ----- 43
	1300 ----- 38	1300 ----- 8	1300 ----- 2	1300 ----- 1
	2600 ----- 0	2600 ----- 0	2600 ----- 1	2600 ----- 1
100-100 270°	0 ----- 25	0 ----- 17	0 ----- 34	0 ----- 33
	1300 ----- 19	1300 ----- 28	1300 ----- 9	1300 ----- 10
	2600 ----- 1	2600 ----- 0	2600 ----- 2	2600 ----- 2
160-100 0°	0 ----- 7	0 ----- 36	0 ----- 43	0 ----- 41
	1300 ----- 33	1300 ----- 8	1300 ----- 1	1300 ----- 3
	2600 ----- 5	2600 ----- 1	2600 ----- 1	2600 ----- 1
160-100 90°	0 ----- 12	0 ----- 16	0 ----- 19	0 ----- 40
	1300 ----- 31	1300 ----- 29	1300 ----- 22	1300 ----- 5
	2600 ----- 2	2600 ----- 0	2600 ----- 4	2600 ----- 0
160-100 180°	0 ----- 26	0 ----- 25	0 ----- 17	0 ----- 22
	1300 ----- 19	1300 ----- 19	1300 ----- 28	1300 ----- 23
	2600 ----- 0	2600 ----- 1	2600 ----- 0	2600 ----- 0
160-100 270°	0 ----- 35	0 ----- 36	0 ----- 40	0 ----- 40
	1300 ----- 10	1300 ----- 7	1300 ----- 4	1300 ----- 4

160-200 0°	2600 ----- 0	2600 ----- 2	2600 ----- 1	2600 ----- 1
	1300 ----- 12	1300 ----- 14	0 ----- 20	0 ----- 26
	2600 ----- 24	2600 ----- 24	1300 ----- 25	1300 ----- 15
	>2600 ---- 9	>2600 ---- 7	2600 ----- 0	2600 ----- 4
160-200 90°	0 ----- 2	0 ----- 24	0 ----- 33	0 ----- 20
	1300 ----- 15	1300 ----- 19	1300 ----- 8	1300 ----- 25
	2600 ----- 28	2600 ----- 2	2600 ----- 4	2600 ----- 0
160-200 180°	0 ----- 15	0 ----- 30	0 ----- 15	0 ----- 30
	1300 ----- 17	1300 ----- 15	1300 ----- 28	1300 ----- 15
	2600 ----- 13	2600 ----- 0	2600 ----- 2	2600 ----- 0
160-200 270°	1300 ----- 10	0 ----- 7	0 ----- 18	0 ----- 18
	2600 ----- 26	1300 ----- 21	1300 ----- 25	1300 ----- 26
	>2600 ---- 9	2600 ----- 17	2600 ----- 2	2600 ----- 1

Como se puede apreciar, cuando la posición del robot se encuentra relativamente cerca de los transmisores, el factor de adaptación varía entre 0 y 1300 pulsos, pero en las medidas relativas a las posiciones más alejadas el factor de corrección se incrementa hasta variar entre 1300 y más de 2600 pulsos.

Este efecto se puede explicar por la variación en la intensidad de la señal recibida por los receptores. Si consideramos que los receptores presentan una variación en su sensibilidad mucho más acusada cuanto mayor sea el ángulo de recepción (Ilustración 7-10), las pequeñas variaciones en el ángulo de recepción en cada receptor afectarán de manera más significativa cuanto mayor sea el ángulo de recepción, hecho que se da en las posiciones más alejadas de los transmisores. Esta variación en la sensibilidad conllevará que el tiempo de excitación de los receptores varíe de manera más acusada, alcanzando más tarde el umbral mínimo para considerar la onda recibida como una señal válida.

Tras corregir el error por capturar la señal de ultrasonidos con un error semejante a un múltiplo de su periodo, lo primero que llama la atención en las medidas obtenidas es la estabilidad en estas. Si agrupamos las medidas por orientación y posición, obtenemos que la varianza en las medidas obtenidas es la que se muestra en la Tabla 3:

**Tabla 3: Varianza del error en las medidas capturadas**

Medida	Desv. TX 1 D1	Desv. TX 1 D2	Desv. TX 2 D1	Desv. TX 2 D2
100-100 0°	8,98 pulsos	93,63 pulsos	48,18 pulsos	54,36 pulsos
100-100 90°	59,96 pulsos	64,04 pulsos	60,62 pulsos	12,56 pulsos
100-100 180°	43,74 pulsos	9,59 pulsos	11,50 pulsos	10,03 pulsos
100-100 270°	11,48 pulsos	8,90 pulsos	36,16 pulsos	50,81 pulsos
160-100 0°	7,75 pulsos	39,53 pulsos	42,04 pulsos	22,80 pulsos
160-100 90°	61,30 pulsos	66,91 pulsos	78,57 pulsos	12,82 pulsos
160-100 180°	73,81 pulsos	17,25 pulsos	27,21 pulsos	12,48 pulsos
160-100 270°	8,70 pulsos	13,57 pulsos	4,71 pulsos	17,62 pulsos
160-200 0°	20,65 pulsos	81,58 pulsos	56,63 pulsos	73,04 pulsos
160-200 90°	64,22 pulsos	93,19 pulsos	53,76 pulsos	46,50 pulsos
160-200 180°	95,71 pulsos	18,61 pulsos	45,71 pulsos	15,76 pulsos
160-200 270°	26,41 pulsos	28,64 pulsos	21,09 pulsos	62,18 pulsos

Este factor está directamente ligado con el error de capturar las señales con un retardo variable. Transformando el error obtenido en tiempo, obtenemos que el error varía entre 0,15 us y 1,7 us. Si observamos la Ilustración 7-13, cuando el error era de 1,9 us, obteníamos que el nodo se localizaba con un error de unos 15 cm para los puntos en donde hemos situado al robot. Este error nos indica que como nuestras medidas varían dentro de ese rango, es de esperar que las posiciones obtenidas al aplicar el proceso de localización se concentren en un área de unos 15 cm<sup>2</sup> en el peor de los casos.

Por último, sólo falta por analizar el error absoluto obtenido entre las medidas capturadas y las medidas estimadas para la posición definida. El error medio se muestra en la Tabla 4:

**Tabla 4: Error medio absoluto en las medidas capturadas**

<b>Medida</b>	<b>Desv. TX 1 D1</b>	<b>Desv. TX 1 D2</b>	<b>Desv. TX 2 D1</b>	<b>Desv. TX 2 D2</b>
100-100 0°	45,53 pulsos	78,18 pulsos	164,85 pulsos	129,23 pulsos
100-100 90°	61,85 pulsos	66,60 pulsos	271,70 pulsos	217,39 pulsos
100-100 180°	105,86 pulsos	70,69 pulsos	68,18 pulsos	49,86 pulsos
100-100 270°	27,00 pulsos	33,87 pulsos	63,08 pulsos	204,89 pulsos
160-100 0°	30,37 pulsos	65,74 pulsos	66,01 pulsos	47,23 pulsos
160-100 90°	43,79 pulsos	143,91 pulsos	115,86 pulsos	164,43 pulsos
160-100 180°	56,31 pulsos	83,95 pulsos	41,81 pulsos	23,69 pulsos
160-100 270°	81,68 pulsos	170,24 pulsos	52,96 pulsos	145,15 pulsos
160-200 0°	26,63 pulsos	222,22 pulsos	32,53 pulsos	105,32 pulsos
160-200 90°	63,84 pulsos	68,51 pulsos	94,94 pulsos	248,90 pulsos
160-200 180°	72,81 pulsos	201,24 pulsos	56,91 pulsos	156,93 pulsos
160-200 270°	52,52 pulsos	36,67 pulsos	57,83 pulsos	206,11 pulsos

Estas medidas representan la principal fuente de errores en nuestro sistema. Si al igual que con la varianza, transformamos estas medidas en tiempos, obtenemos que las medidas calculadas presentan un error comprendido entre 0,46 us y 4,77 us. El efecto de este error es que el punto medio que se obtiene al aplicar el proceso de localización con todas las medidas obtenidas distará del punto de referencia (el obtenido con el error al considerar la onda plana) entre 2,7 cm y 22 cm.

Este error creemos que viene definido en buena parte por un incorrecto emplazamiento de los receptores. Al estar el robot en una fase de prototipado, desarrollamos un proceso manual para emplazar los receptores en el robot, sin tener en cuenta el gran error que estábamos introduciendo. Este proceso derivó un error de hasta 2 mm en la posición de los receptores respecto a su posición ideal, obteniendo un efecto indeseado semejante al comentado en el apartado 7.4.

### 8.3 Sistema de Localización y Orientación

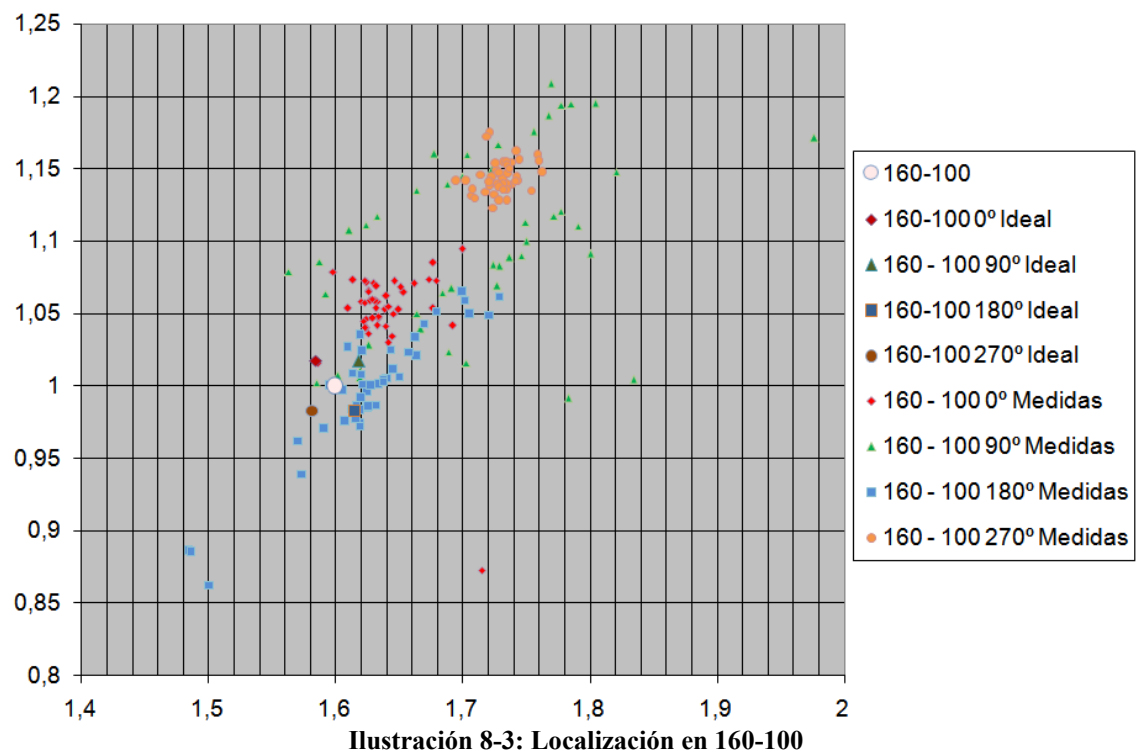
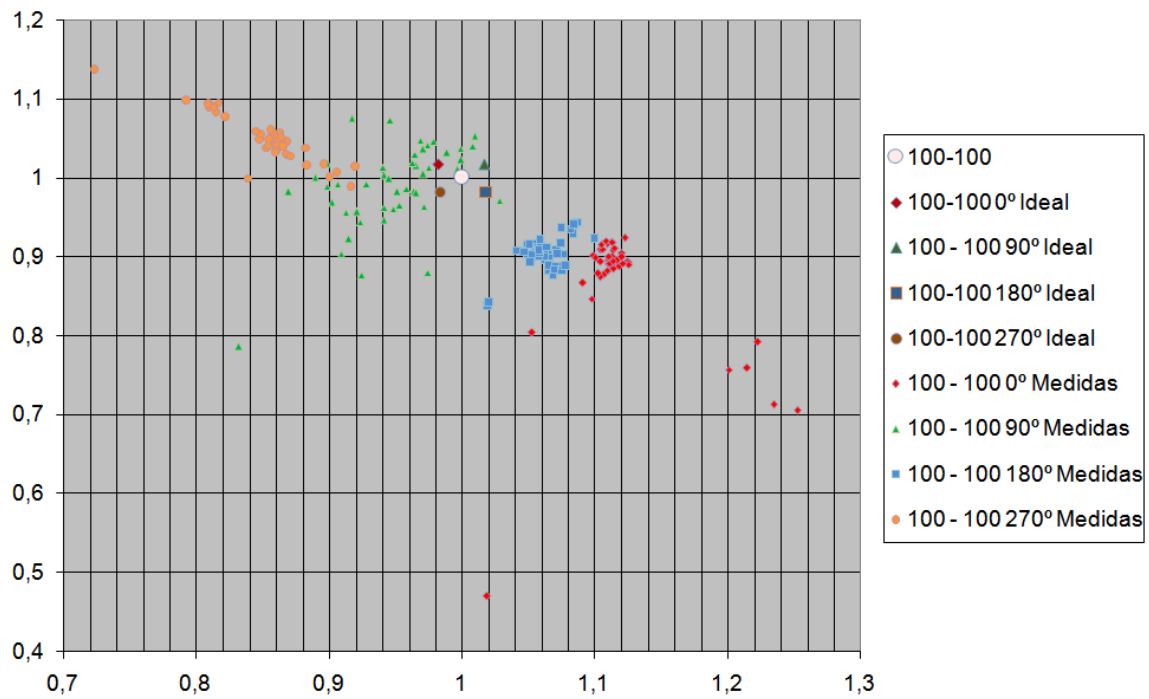
Con las medidas antes presentadas procedimos a aplicar el algoritmo de localización. Para ello, el primer paso es el cálculo del ángulo de recepción vertical, cuyo resultado se recoge en la Tabla 5.

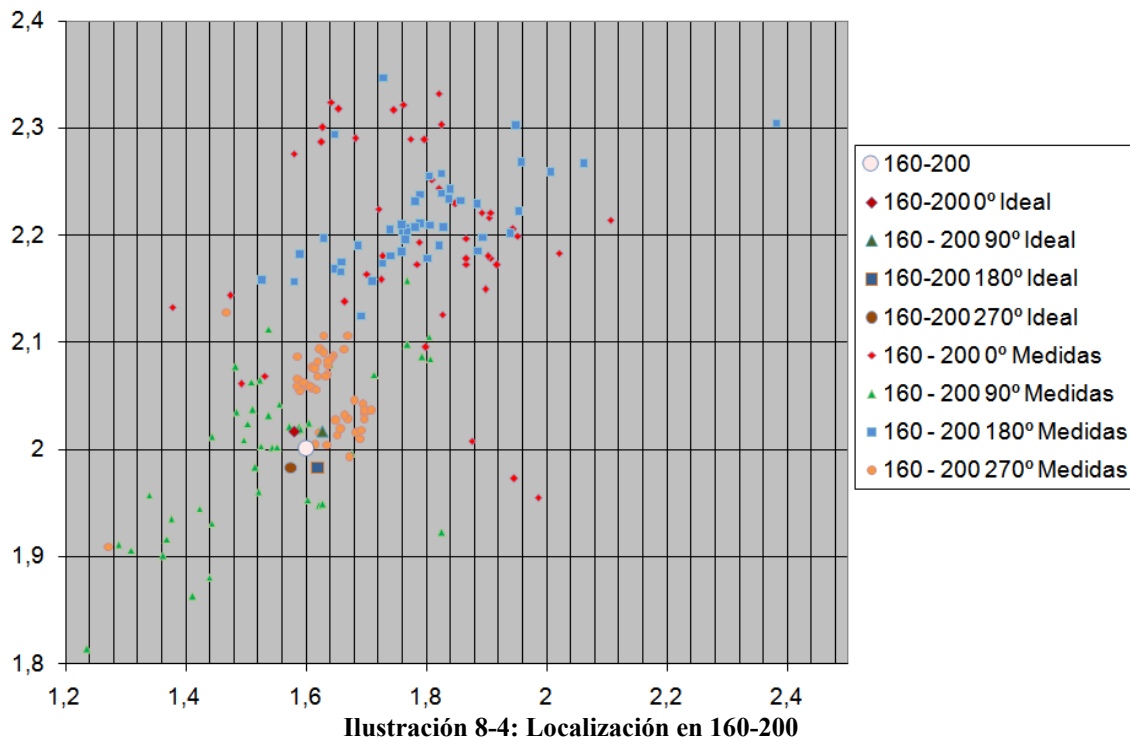
En esta tabla se muestra el error en la estimación del ángulo vertical respecto al caso calculado teóricamente de la mediana de las 45 posibles posiciones para cada grupo de medidas.

**Tabla 5: Error ángulo vertical**

<b>Mediana</b>	<b>Error Ángulo Tx1</b>	<b>Error Ángulo Tx2</b>
100-100 0°	0,23 °	2,74 °
100-100 90°	1,07 °	0,65 °
100-100 180°	0,36 °	1,21 °
100-100 270°	0,60 °	2,05 °
160-100 0°	0,81 °	0,03 °
160-100 90°	1,76 °	0,10 °
160-100 180°	0,32 °	0,04 °
160-100 270°	2,96 °	0,77 °
160-200 0°	3,20 °	1,25 °
160-200 90°	0,62 °	0,27 °
160-200 180°	3,04 °	2,07 °
160-200 270°	1,08 °	0,86 °

Una vez el sistema conoce el ángulo de recepción vertical, este es capaz de calcular su posición, obteniendo los resultados que se muestran en la Ilustración 8-2, en la Ilustración 8-3 y en la Ilustración 8-4 (en estas figuras los ejes están en metros en lugar de cm):





*Nota: Las posiciones ideales hacen referencia a las posiciones obtenidas con las medidas teóricas, las cuales sólo tienen en cuenta el error por considerar como onda plana la señal recibida.*

El sistema teóricamente funcionaría con un error de unos pocos centímetros para cualquier orientación y posición de las antes presentadas. Sin embargo, los errores existentes en las medidas hacen que el sistema pierda mucha precisión, viéndose incrementado el error final en el cálculo de la posición del nodo.

Los resultados obtenidos se pueden resumir en la Tabla 6. En esta, se escoge la mediana de las 45 posibles posiciones para cada grupo de medidas y se muestra el error respecto a la posición en donde se ha colocado el robot (referencia) y el error respecto a la posición teórica.

**Tabla 6: Errores localización mediana - teórico - referencia**

<b>Mediana</b>	<b>Error medidas teóricas-referencia</b>	<b>Error medidas reales-referencia</b>	<b>Error medidas reales-teórica</b>
100-100 0°	2,54 cm	15,33 cm	17,87 cm
100-100 90°	2,43 cm	5,27 cm	7,2 cm
100-100 180°	2,53 cm	11,28 cm	8,83 cm
100-100 270°	2,42 cm	14,73 cm	13,95 cm
160-100 0°	2,33 cm	6,07 cm	5,84 cm
160-100 90°	2,54 cm	15,45 cm	12,92 cm
160-100 180°	2,32 cm	3,26 cm	2,38 cm
160-100 270°	2,53 cm	19,78 cm	22,31 cm
160-200 0°	2,64 cm	30,84 cm	31,27 cm
160-200 90°	3,13 cm	5,36 cm	7,95 cm
160-200 180°	2,61 cm	28,61 cm	28,74 cm
160-200 270°	3,09 cm	7,45 cm	9,98 cm

Si con las mismas medidas aplicamos el algoritmo para la obtención de la orientación horizontal, obtenemos los resultados obtenidos en la Tabla 7:

**Tabla 7: Error ángulo horizontal**

<b>Mediana</b>	<b>Error Ángulo Teórico</b>	<b>Error Ángulo Medidas</b>
100-100 0°	0,76 °	2,83 °
100-100 90°	0,00 °	0,45 °
100-100 180°	0,76 °	2,67 °
100-100 270°	0,00 °	0,14 °
160-100 0°	0,54 °	1,15 °
160-100 90°	0,16 °	1,52 °
160-100 180°	0,54 °	1,40 °
160-100 270°	0,17 °	0,63 °
160-200 0°	0,37 °	3,25 °
160-200 90°	0,06 °	0,54 °
160-200 180°	0,37 °	1,46 °
160-200 270°	0,06 °	0,18 °

Se observa que el sistema es capaz de estimar el ángulo de recepción de la señal de ultrasonidos con un error menor que 4°, precisión suficiente para el sistema de orientación del robot. Sin embargo, esta precisión no es suficiente para aplicar el algoritmo de localización, generando un error bastante elevado (llegando a superar los 30 cm), lo cual demuestra que es necesario aumentar la precisión.



## 9 Conclusiones

En este trabajo se propone un novedoso sistema de localización y orientación DTOA, basando la estimación del ángulo de recepción de la señal de referencia. Para ello se hace uso de la tecnología de los ultrasonidos, capturando la diferencia de los tiempos de llegada entre tres receptores. El ángulo de recepción se calcula respecto a uno de estos receptores, siendo los otros dos receptores utilizados como receptores auxiliares.

Para que el sistema funcione correctamente, la distancia entre los receptores debe ser despreciable respecto a la distancia existente entre el transmisor y el propio nodo. Además, para poder aplicar correctamente los algoritmos para el cálculo de la posición y orientación del nodo es necesario que los receptores se distribuyan siguiendo la forma de un triángulo isósceles rectángulo. La complejidad de la algoritmia necesaria para implementar el sistema de localización y orientación es reducida, permitiendo implementarla en dispositivos de bajo coste como microcontroladores o FPGAs.

Además, en este trabajo se presenta un prototipo del sistema, en el que el robot obtiene las medidas necesarias para el cálculo del algoritmo y las envía a un PC en donde son procesadas. Este prototipo se ha utilizado para medir la precisión del sistema de captura del ángulo de recepción, obteniendo resultados con errores menores que 4° tanto para la estimación del ángulo horizontal como en el vertical, lo cual demuestra que es factible utilizar esta tecnología para implementar el sistema de orientación del robot. Sin embargo, con la precisión obtenida el sistema de localización presenta errores de hasta 30 cm, lo cual indica la necesidad de mejora en este aspecto.

## 10 Trabajo futuro

- Mejorar el sistema de digitalización de la señal de ultrasonidos, utilizando un ADC, para reducir la variabilidad en las medidas capturadas.
- Agregar un sensor de temperatura al sistema para de este modo reducir los errores por considerar la velocidad de propagación de la velocidad de ultrasonidos como constante.
- Analizar si es posible ampliar la distancia entre receptores adaptando, posteriormente mediante SW, las medidas obtenidas para eliminar el error por onda plana.
- Analizar la mejora que supondría el uso de un cuarto receptor el sistema de estimación del ángulo vertical y horizontal.
- Mejorar la distribución de los receptores mediante un proceso de fabricación industrial.
- Añadir un inclinómetro al plano donde se distribuyen los receptores para poder utilizar el sistema en terreno que no sea llano.
- Añadir un sistema para el cálculo de la orientación (brújula electrónica) para reducir el número de transmisores necesarios de dos a uno para el sistema de localización en 2D.
- Analizar el uso de radiofrecuencia como señal de referencia en este tipo de sistemas.